

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra Elektroenergetiky**

**Diagnostika asynchronního motoru z externího  
rozptylového pole**  
**Diagnosis of Asynchronous Motor by External Field  
Analysis**

**2019**

**Jan Ďurica**

# Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Ďurica**  
Studijní program: **B2649 Elektrotechnika**  
Studijní obor: **3907R001 Elektroenergetika**  
Téma: **Diagnostika asynchronního motoru z externího rozptylového pole**  
**Diagnosis of Asynchronous Motor by External Field Analysis**  
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Teoretický rozbor, základní popis a princip asynchronního motoru
3. Popište základní diagnostické metody pro asynchronní motor
4. Proveďte vybrané diagnostické měření na asynchronním motoru
5. Měření vyhodnoťte a analyzujte získané údaje
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- MENTLÍK, Václav, et al. Diagnostika elektrických zařízení, 2008, Praha, BEN
- KOPYLOV, Igor, Petrovič. Stavba elektrických strojů, 1988, Praha, SNTL/MIR
- CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů, Praha, 1958, SNTL
- KAČOR, Petr. Vybrané typy elektrických strojů, Ostrava, 2010, VŠB-TU Ostrava
- Katalogy a katalogové listy
- Odborné a technické www stránky
- Příspěvky vědeckých konferencí a časopisy
- Technické normy


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

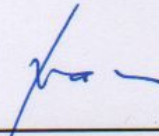
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 23. 4 2019 .....

.....  


Podpis autora

## Poděkování:

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, Ing. Petr Kačor Ph.D., za veškeré rady a konzultace týkající se asynchronního motoru a jeho diagnostiky. Také za poznatky z praxe a metodické vedení bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá diagnostikou asynchronního motoru za pomoci externího rozptylového pole, které je snímáno sledovací cívkou a přes osciloskop přeneseno do PC, kvůli FFT analýze. Jsou zde také vysvětleny základní principy funkce a konstrukce asynchronních strojů, ale také diagnostika jako taková, včetně technické diagnostiky a různých diagnostických metod a jejich rozdělení.

## **Klíčové slova**

Diagnostika, asynchronní motor, FFT analýza, externí rozptylové pole, technická diagnostika

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with diagnostics of asynchronous motor with external field analysis, which is measured with USB oscilloscope, then we get signal to PC, where I did FFT analysis, which can be use, to judge about condition asynchronous motor. In this thesis I explain some definitions about induction machine or about a diagnostic.

## **Key words**

Diagnostics, asynchronous motor, FFT analysis, external field, technical diagnostics

## Obsah

1	Seznam obrázků a tabulek .....	6
2	Seznam symbolů a zkratk .....	7
3	Úvod.....	9
4	Asynchronní motor.....	10
4.1	Konstrukce .....	11
4.1.1	Stator .....	11
4.1.2	Rotor.....	12
5	Diagnostika .....	14
5.1.1	Ochranná zařízení .....	14
5.1.2	Definování nebezpečí .....	15
5.2	Technická diagnostika .....	16
5.2.1	Prognostický proces.....	19
5.2.2	Poruchy a jejich zjišťování .....	20
5.2.3	Metody technické diagnostiky .....	20
5.2.4	Diagnostikované součásti zařízení .....	21
5.2.5	Časté závady elektrických zařízení a projevy s nimi spojené.....	22
5.2.6	Provozní diagnostika asynchronních strojů.....	22
5.2.7	Přerušení rotorové tyče asynchronního motoru.....	23
6	Porovnání poškozeného a nepoškozeného motoru .....	24
6.1.1	FFT analýza .....	24
6.1.2	Analýza poruch motoru .....	25
6.1.3	Zjištění počtu rotorových tyčí.....	26
6.1.4	Měření počtu rotorových tyčí .....	27
6.1.5	Měření prasklé rotorové tyče .....	27
6.1.6	Modelování a simulace pomocí numerických metod.....	29
6.2	Měření dvou motorů o stejných parametrech.....	29
6.2.1	Fotodokumentace měření.....	30
6.2.2	FFT analýza nepoškozeného motoru .....	32
6.2.3	FFT analýza poškozeného rotoru .....	34
6.2.4	Porovnání při jmenovitých otáčkách.....	36
6.3	Diagnostika motoru z externího rozptylového pole .....	37
7	Závěr .....	38
8	Seznam literatury a informačních zdrojů.....	39

## 1 Seznam obrázků a tabulek

Obrázek č.1 Obecná momentová charakteristika asynchronního stroje.....	11
Obrázek č.2 Schéma úloh diagnostiky [2] .....	15
Obrázek č.3 Koncepce technické diagnostiky [2] .....	18
Obrázek č.4 Způsob diagnostického měření statorového proudu asynchronního stroje [2] .....	22
Obrázek č.5 Obrázek nehladkého rotoru a statoru. [4] .....	26
Obrázek č.6 Hladký rotor Asynchronního motoru [5].....	26
Obrázek č.7 FFT analýza nepoškozeného motoru při 1450 otáčkách.....	28
Obrázek č.8 FFT analýza poškozeného motoru při 1450 otáčkách.....	28
Obrázek č.9 Zapojení napájení na motoru a umístění sledovací cívky, napojení motoru na dynamometr přes spojku.....	30
Obrázek č.10 Nepoškozený asynchronní motor a umístění sledovací cívka .....	30
Obrázek č.11 Počítač na kterém se pomocí softwaru TiePie vyhodnocovala FFT analýza ....	31
Obrázek č.12 Počítač s programem LabView, pro sledování veličin motoru .....	31
Obrázek č.13 FFT analýza nepoškozeného motoru naprázdno .....	32
Obrázek č.14 FFT analýza nepoškozeného motoru při 1425 otáčkách za minutu .....	33
Obrázek č.15 FFT analýza nepoškozeného motoru při 1450 otáčkách za minutu .....	33
Obrázek č.16 FFT analýza nepoškozeného motoru při 1475 otáčkách za minutu .....	34
Obrázek č.17 FFT analýza poškozeného motoru naprázdno .....	34
Obrázek č.18 FFT analýza poškozeného motoru při 1425 otáčkách za minutu .....	35
Obrázek č.19 FFT analýza poškozeného motoru při 1450 otáčkách za minutu.....	35
Obrázek č.20 FFT analýza poškozeného motoru při 1475 otáčkách za minutu .....	36
Obrázek č.21 FFT analýza nepoškozeného motoru při jmenovitých otáčkách .....	37
Obrázek č.22 FFT analýza poškozeného motoru při jmenovitých otáčkách.....	37
Tabulka č.1 Hodnoty změřené či vypočtené ze vzorce .....	27

## 2 Seznam symbolů a zkratek

### Symbols:

$2p$	Počet pólů	[-]
$\omega$	Úhlová rychlost	[rad·s <sup>-1</sup> ]
$\cos \varphi$	Účíník	[-]
$D_{IN}$	Průměr vnitřní části cívk	[mm]
$f_l$	Napájecí frekvence	[Hz]
$f_d$	Dynamická frekvence	[Hz]
$f_v$	Statická frekvence	[Hz]
$I_n$	Jmenovitý proud	[A]
$M_k$	Záběrný moment	[Nm]
$M_{MAX}$	Maximální moment/ moment zvratu	[Nm]
$M_n$	Jmenovitý moment	[Nm]
$N_{COIL}$	Počet závitů cívk	[-]
$n$	Otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$n_d$	Stav excentricity	[-]
$n_n$	Jmenovité otáčky	[min <sup>-1</sup> ]
$n_x$	Pořadí vyšších harmonických, pocházejících ze zdroje (1,3,5 atd.)	[-]
$p$	Počet pólových dvojic	[-]
$P_N$	Jmenovitý výkon	[W]
$s$	Okamžitý skluz	[-]
$s_{MAX}$	Maximální skluz/ Skluz zvratu	[-]
$s_n$	Jmenovitý skluz	[-]
$t$	Čas	[s]
$U$	Napětí	[V]
$U_n$	Jmenovité napětí	[V]
$Z_R$	Počet rotorových tyčí	[-]
$Z_S$	Počet statorových tyčí/vinutí	[-]

**Zkratky:**

D - Zapojení do trojúhelníku

DFT – Diskrétní Fourierova transformace

exp – Exponenciála

FT – Fourierova transformace

FFF – Fast Fourier Transformation/Rychlá Fourierova transformace

SFFT – Short Fast Fourier Transformation/Krátká rychlá Fourierova transformace

Y – Zapojení do hvězdy



### 3 Úvod

V této práci se zabírám asynchronním motorem a jeho diagnostikou. Na začátku je vysvětlen princip funkce asynchronního motoru včetně konstrukce, které se u asynchronního motoru využívají. Poté jsem rozebral téma diagnostiky, kde jsem zmínil různé definice nebezpečí či provozu, ale také jsem zmínil metody diagnostiky na elektrických zařízeních a jejich princip funkce a jejich stručné rozdělení. Také jsem zde zběžně vysvětlil princip funkce FFT analýzy, kterou jsem využil právě při diagnostice asynchronního motoru.

Dále jsem se zabýval diagnostikou dvou totožných motorů, kde jsem v jednom z nich vyvrtal do rotoru otvor a tím vznikla rozpojení rotorové tyče. Tuto poruchu jsem právě diagnostikoval pomocí rozptylového externího pole asynchronního motoru a přes USB osciloskop a přenos signálu do počítače jsem udělal v softwaru TiePie FFT analýzu, ze které jsem určoval diagnostický stav motoru.

Určoval jsem ho podle výskytu parazitních frekvencí jak v pásmu vyšších harmonických, tak i v pásmu základní napájecí frekvence. U poškozeného motoru se ve stavu naprázdno neprojevili žádné parazitní frekvence, které by naznačovali vadu, oproti nepoškozenému motoru. Naopak nejvíce je rozdíl vidět při jmenovitém zatížení, kde u nepoškozeného je výrazná frekvence napájecí a její liché násobky, kdežto u poškozeného motoru jsou zřetelně vidět parazitní frekvence, které se nachází blízko těchto lichých násobků i u samotné napájecí frekvence.

## 4 Asynchronní motor

Asynchronní stroj se v dnešní době využívá hlavně v provozu v režimu motor. Je to jeden z nejčastěji se vyskytujících pohonů, jak v domácnostech, tak i v oblasti průmyslu. Jednoduchá konstrukce způsobuje nízkou cenu a lehkou údržbu asynchronních strojů. Spolehlivost je dalším znakem jednoduché konstrukce. Zastoupení mají jak v řádech wattů až v desítkách MW. Nejčastější využití asynchronních motorů je v dopravnících, výtazích, kompresorech, čerpadlech a ventilátorech.

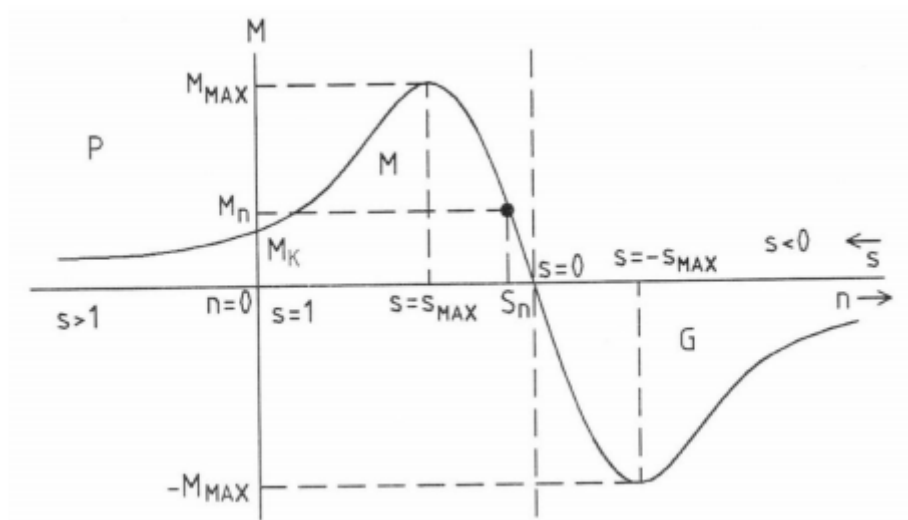
Nejčastěji se pro vznik točivého elektromagnetického pole využívá třífázové soustavy, kde se využívá vzájemného posunutí fází mezi sebou o  $120^\circ$  elektrických. Napájení třífázové sítě je ve valné většině harmonické a vyznačuje se harmonickým průběhem proudu, v nichž se jednotlivé fáze liší stejnými  $120^\circ$  elektrickými. Díky umístění rotoru uprostřed statorového vinutí, se ve vinutí rotoru začne indukovat napětí a začne rotorovým vinutím procházet proud. Rotorový proud vytvoří ve vinutí rotoru své elektromagnetické pole. Vzájemným působením pole statoru a rotoru na sebe vznikne Lorentzova síla, která nám začne roztáčet těleso rotoru až na jmenovité otáčky, kdybychom nechali otáčky vzrůst až na synchronní otáčky. Přestalo by se indukovat ve vinutí rotoru napětí a přestal by téct klecí rotoru proud a Lorentzova síla, která otáčí rotorem by zanikla. Ventilací a třecí ztráty nám určí, že otáčky pole rotoru musí být tudíž menší než otáčky statorového pole.

Tady se nám objevuje veličina, která se nazývá skluz. Skluz je poměr rychlosti pole rotoru vůči synchronní rychlosti pole statorového vinutí. Skluz je vyjádřen tímto vztahem: [2]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (1)$$

Z této rovnice je zřejmé, že se bude podle skluzu stroj chovat jinak. Je-li skluz mezi nulou a jedničkou stroj funguje jako motor. Pokud stroj, který je v klidu zapojíme do sítě bude se skluz rovnat jedné. Pokud stroj poběží, ale nebude zatížen, bude se točit synchronními otáčkami a skluz se bude rovnat nule. Pokud se se skluzem dostaneme do záporných hodnot, stroj je ve stavu generátor. Stroj se může využít i jako brzda, v tom případě bude skluz větší jedné.

Na momentové charakteristice lze také vidět jednotlivé režimy asynchronního motoru. Je to zřetelně vidět na Obr. 1, kde je momentová charakteristika asynchronního stroje v závislosti na skluzu, případně na otáčkách rotoru. Na charakteristice jsou vyznačeny body, které jsou důležité pro provoz tohoto stroje. Pokud se na této charakteristice pohybuje stroj mezi maximálním momentem  $M_{\max}$  a jmenovitým momentem  $M_n$  jedná se o motorický režim, který je využívám nejčastěji. Pokud překročíme při rozběhu motoru z klidu záběrný moment  $M_k$  motor se neroztočí a musíme zátěž snížit.



Obrázek č.1 Obecná momentová charakteristika asynchronního stroje

## 4.1 Konstrukce

Asynchronní stroj má dvě části. Stator, který je pevnou částí stroje a je připevněn k podstavě. Dále rotor, který se otáčí a je upevněn ve statoru za pomoci ložisek.

Při konstrukci stroje je nutné dimenzovat podle určení stroje a v jakém prostředí bude využíván. Z prostředí nás může zajímat, třeba vlhkost vzduchu, popřípadě jestli se může v tomto prostředí vyskytnout tekutina, či vniknutí cizích těles do soustrojí. Základní ochrany jsou označeny dvojicí písmen IP a příslušným dvojčíslím. Musíme také znát v jakém rozsahu výkonů se bude stroj využívat kvůli dostatečnému odvodu tepla, pomocí ventilátorů. I toto se označuje dvojicí písmen i s dvojčíslím IC XX. Pokud se jedná o stroj, velkých výkonů, musíme myslet i na jeho přepravu a možnou demontáž, převoz a následné zpětné smontování na místě, kde bude motor fungovat. I samotný tvar se označuje písmeny IM a za nimiž následuje trojčíslí, které nám právě určuje tvar stroje.

### 4.1.1 Stator

Stator asynchronních strojů menších výkonů má několik částí: kostru, magnetický obvod, vinutí, svorkovnice a ložiskové ochranné štíty

#### Magnetický obvod

Vzniká spojováním navzájem od sebe izolovaných plechů. Tyto plechy mají tloušťku většinou do 0,5mm. Samotný obvod složený z plechů má v sobě umístěné drážky, ve kterých je vloženo vinutí statoru. Takto spojené plechy drží celý stroj pohromadě a říká se jim kostra.

#### Vinutí

Samotné vinutí je tvořeno cívkami, které jsou ve valné většině tvořeny mědí, která je izolována a toto vinutí je uloženo ve statorových drážkách.

#### Ložiskové ochranné štíty

Zamezují vniku cizích těles do soustrojí, což by mohlo způsobit závadu stroje. Kromě ochranné funkce jsou v nich uloženy samotná ložiska, které umožňují rotační pohyb rotoru.

### 4.1.2 Rotor

Rotor samotný je složen z elektromagnetických plechů. Mezi samotným rotorem a statorem je vzduchová mezera, která by měla být co nejmenší, abychom zmenšili magnetický odpor samotných částí. Samotná vzduchová mezera nabývá až 2 mm u větších strojů. Oproti synchronním strojům nemá asynchronní vyniklé póly na rotoru. V rotoru samotném je umístěna hřídel, která u menších strojů je z jednoho kusu. Pokud je potřeba odvádět více tepla, než samotný motor dokáže, umístí se na samotnou hřídel ventilátor, který se otáčí a tím ochlazuje samotný motor. Rotor asynchronní stroje je často nazýváme kotva a rozlišujeme více druhů kotev: vinutá a tzv. kotva nakrátko

#### Kotva vinutá

Vinutí v tomto provedení je podobné jako u statorového vinutí. Vinutí samotné je vždy zapojeno do hvězdy a zpravidla bývá trojfázové a má stejný počet pólů jako stator samotný. Konec vinutí je vyveden na kartáče a kroužky. Díky této konstrukci je možné snížit záběrný proud přidáním přidavného odporu při rozběhu motoru z klidu. Po naběhnutí na jmenovité otáčky, můžeme tento přidavný odpor odpojit. Z důvodů opotřebování právě kroužků a kartáčů je údržba poměrně nákladná a složitá, proto toto konstrukční řešení nevidáme tak často.

#### Kotva nakrátko

Nejrozšířenější druh konstrukce asynchronního stroje. Vinutí jako klasické zde není, je nahrazeno tyčemi, které ukládáme do drážek v rotoru, takto vyrobený rotor se nalisuje na hřídel a tyče se na konci spojí, proto kotva nakrátko. Tohoto řešení se docílí nejčastěji dvěma metodami a sice odlévání či pájení, dále rozlišujeme samotný materiál a tvar tyčí. Do odlité kotvy poté vložíme rotorové plechy neboli rotorový svazek. Při odlévání se vytvoří i samotné kruhy nakrátko, které budou držet celý rotorový svazek pohromadě. U některých motorů lze vidět lopatky na kruzích nakrátko, jedná se o zlepšení chladících vlastností motoru. U pájení klece se do drážek musí vložit tyče a až poté můžeme nasadit kruhy nakrátko. Kruh nakrátko by se neměl dotýkat rotoru.

#### Speciální kotvy

Asynchronní motor je stále jeden z nejpoužívanějších motorů i přesto, že má dvě velké nevýhody. Jedná se o malý záběrný moment a velký záběrný proud, obojí je způsobeno odporem a reaktancí kotvy. Právě díky tomuto můžeme upravením kotvy upravit tyto nevýhody a co nejvíce je zmenšit.

Pokud při rozbíhání motoru z klidu zvýšíme odpor kotvy, snížíme podle Ohmova zákona záběrný proud a přitom zvýšíme záběrný moment stroje. Naopak při jmenovitém momentu chceme odpor kotvy omezit co nejvíce. Pokud bude odpor kotvy velký budeme se více zahřívat, díky Joulovým ztrátám a bude potřeba ho mnohem více chladit. V tomto případě využíváme jednoduchého principu skinefektu.

- **Kotva vírová**

U této kotvy, využíváme vířivých proudů, od čehož je odvozen i název kotvy. Drážky jsou úzké a hluboké. Většinou mají tvar obdélníku či lichoběžníku, do kterých se odlévají tyče, které zde fungují jako vinutí. Při zapojení stroje do sítě má rotor téměř stejnou frekvenci jako je frekvence statoru a drážkami začne procházet rozptylové pole, díky kterému vzniknou vířivé proudy, které začnou proud vytlačovat ven z rotoru směrem do vzduchové mezery. Změna hustoty proudu nám způsobí při rozběhu zvýšení odporu kotvy a tudíž i snížení záběrného proudu a kvůli snížení reaktanci se a to má za následek zvýšení záběrného momentu. Při jmenovitých otáčkách, je proudová hustota téměř všude konstantní a nevznikají přídavné ztráty.

- **Kotva dvojité**

Jak už nám říká název, jedná se o soustavu dvou klecí, ve kterých se opět využívají tyče. Klec, která je blíže vzduchové mezeře neboli rozběhová je tvořena z materiálu, který má vysoký odpor, čímž docílíme snížením záběrného proudu. Při jmenovitém momentu se nám „aktivuje“ klec vnitřní která má nízkou reaktanci a proud bude rozdělen podle odporů klecí. Jsou dva způsoby konstrukce a to odlévání nebo skládání, vzhledem k náročnosti výroby, nejsou natolik využívány jako vírové klece.

## 5 Diagnostika

Pokud provozujeme jakéhokoliv zařízení, vyskytuje se riziko závady, nebo nesprávného fungování či dokonce nebezpečí. Toto riziko se nedá určit s naprostou přesností, ale nedá se také přesně určit definice rizika jako takového. V technickém oboru se riziko definuje jako možnost, že daný přístroj se přestane chovat, jak je očekáváno a může způsobit nebezpečné prostředí což může mít za následek nežádoucí následky.

Pokud dosáhneme jiného, než očekávaného výsledku jedná se o možnost rizika. Toto riziko je způsobeno nedostatečnou znalostí zařízení nebo podmínek, které se mohou během provozu zařízení změnit. Při každém rozhodnutí subjekt podstupuje riziko. Podle matematických, statistických či simulačních metod se dá určit pravděpodobnost vzniku rizika u daného zařízení.

Abychom posoudili riziko, musíme provést analýzu nebezpečí, které přímo souvisí se závadou námi sledovaného zařízení. Do toho spadá i zhodnocení důsledků poruch či havárie nebo ohodnocení rizika přerušení dodávky elektrické energie. Většinou se jedná o kvantitativní posouzení rizik a jejich opatření pro snížení pravděpodobnosti jejich výskytu. Je třeba brát v potaz, také stáří daného zařízení a jestli se nezměnili podmínky ve kterých se využívá. Dále je potřeba prostudovat konstrukci a katalog daného zařízení jakým způsobem můžeme či nemůžeme do stroje a do jeho ochrany zasahovat. Je potřeba také proškolit obsluhu daného zařízení, aby s ním zacházela podle toho jak je zařízení sestaveno a k tomu jak se používat má.

### 5.1.1 Ochranná zařízení

Při použití ochranných zařízení se sníží úroveň rizika daného objektu. Tyto použité zařízení musí splňovat bezpečnostní funkci. Vznikne nám pak část systému, která se zabývá jeho bezpečností a která bude reagovat na signály, které mohou bezpečnost ohrozit a sama své signály vytvářet, proto se tato zařízení skládají jak z hardwarových částí tak i ze softwarových.

Takto vzniklá část systému se nazývá bezpečnostní a je složena ze samotných ochranných zařízení, prvky silového ovládání či samotné ovládací jednotky. Tudiž se skládá z čidel tlaku, teploty, programovatelných ochran, snímačů polohy či klasických relé.

Diagnostiku jako takovou většinou aplikujeme na objekt jako celek, nikoliv však na samotné vlastnosti a stav součástí tohoto objektu, které zde jsou kvůli bezpečnostnímu systému a mají své bezpečnostní funkce. Většinou nehodnotíme spolehlivost a chování v časové závislosti, ale v závislosti na tom jak vykonávaly svou bezpečnostní funkci a zda nenastala nebezpečná událost, která mohla tyto bezpečnostní zařízení poškodit, aby sami bezpečnostní zařízení nezpůsobily havárii daného objektu, z důvodu poškození předchozího nebezpečného stavu, kterému byly vystaveny. Z toho vyplývá, že diagnostiky zajímají i samotné bezpečnostní prostředky a zařízení, které samotnou bezpečnost zajišťují a sice jejich spolehlivost a poruchovost.

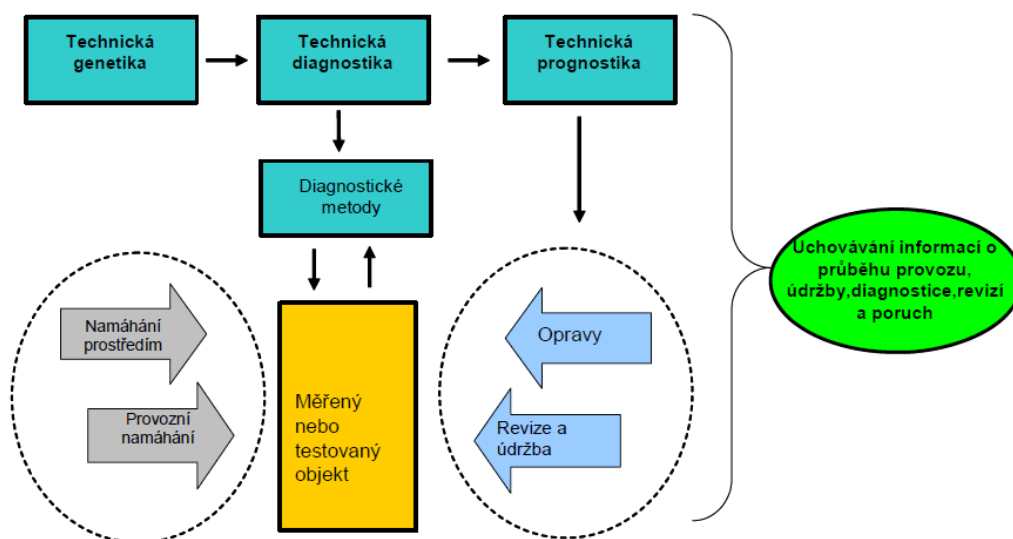
„Jestliže pak hodnotíme bezpečnost či spolehlivost technického díla pak se musíme zajímat o nepředvídané události a jejich následky. K tomu nám mohou pomoci i normy, které tvoří skupinu bezpečnostních norem, jejichž obecná struktura a je následující:

- a) Normy typu A uvádějí základní pojmy, zásady pro konstrukci a všeobecná hlediska, která mohou být aplikována na všech strojních zařízeních.

- b) Normy typu B zabývající se jedním nebo více bezpečnostními hledisky nebo jedním nebo více typy ochranných zařízení, která mohou být použita pro větší počet strojních zařízení:
- normy typu B1 se týkají jednotlivých bezpečnostních hledisek (např. bezpečných vzdáleností, teploty, povrchu, hluku);
  - normy typu B2 se týkají příslušných bezpečnostních zařízení (např. dvouručního ovládání, blokovacích zařízení, zařízení citlivých na tlak, ochranných krytů).
- c) Normy typu C určují detailní bezpečnostní požadavky pro jednotlivý stroj nebo skupinu strojů.

Dále existují základní bezpečnostní normy pro strojní zařízení a pro funkční bezpečnost elektrických, elektronických a programovatelných systémů. Na základě těchto norem vznikají normy typu B. Norem typu C (produktové normy) je minimální množství, jelikož jejich existence závisí na postupné implementaci technických poznatků do praxe.

Snahou všech provozovatelů, projektantů i dalších je snižování rizika. K tomu může posloužit i diagnostika se svými metodami.“ [2]



Obrázek č.2 Schéma úloh diagnostiky [2]

### 5.1.2 Definování nebezpečí

Před tím, než se budeme zabývat samotnou diagnostikou je třeba si definovat pojem bezpečí a nebezpečí. Bezpečnost je většinou definována jako osvobození od ohrožení, či od samotného nebezpečí. Bezpečnost je náš cíl a tudíž bychom si měli vymezit a odhadnout prvky, které nám pomůžou určit situaci, jestli je bezpečná či nikoliv. Popřípadě si můžeme situace rozdělit podle stupňů na různě bezpečné a nebezpečné.

Definice nebezpečí je povětšinou označena jako nenadálé ohrožení majetku nebo života nebo kombinaci rizik, které mohou porušit opatření o bezpečnosti. Nebezpečí jako takové se může rozdělit na dvě formy a sice:

- Přijatelná forma
- Nepřijatelná forma.

První forma je ospravedlnitelná a týká se případu válečného stavu či evakuací nebo záchranných akcí. Druhá forma vzniká při porušení jakéhokoliv opatření z důvodu bezpečnosti vedoucí až k úrazům, smrti nebo poškození jiného majetku, dalším důvodem této druhé formy je i nedostatečná ochrana před nebezpečím

Na konci této části si můžeme definovat základních pět bodů, které musí brát v potaz diagnostici, výrobci, právní zástupci a obecně specialisté zabývající se diagnostikou nebo popřípadě výrobou či tvorbou bezpečnostních pravidel:

- S ohledem na výsledek identifikovat nebezpečí.
- Prokázat nepřiměřenost nebezpečí.
- Identifikovat nebezpečnost v kombinaci s rizikem, které tvoří nebezpečí.
- Odhadnout riziko.
- Identifikovat změny a specifikace jako součást řetězce, který vede k úrazu či výsledné nehodě

## 5.2 Technická diagnostika

Diagnostika jako taková je nezbytná v rozhodovacím procesu při úkolech týkající se jak údržby, tak i samotného provozu. Kontrolovány jsou všechny spolehlivostní a technické parametry již při technologickém procesu a průběhu výroby. Materiál by si měl zkontrolovat už samotný výrobce, předtím, než jej převezme od dodavatele a přezkoumat vlastnosti jak technické, tak i bezpečnostní daného materiálu a zdali splňuje všechny požadavky, které by daný materiál měl splňovat v rámci budoucích procesů, které tento materiál čekají. Tato kontrola materiálu může samotnému výrobcu ušetřit finance na základě lepší kvality a menší poruchovosti daného výrobku z důvodu pozdější reklamace. Při výstupní kontrole musí být zase daný výrobek zkontrolován, aby splňoval vše co splňovat má a zda se neliší od zadání, ve kterém byl určen jeho účel, tvar, pevnost atd. Tato kontrola je důležitá také vzhledem k budoucím možným reklamám, popřípadě žalobám, kdyby se něco s výrobkem stalo a poškodilo to nějaké zařízení popřípadě někoho zranilo či zabilo. Pokud se najdou nedostatky, měl by se výrobek vrátit do výrobního procesu, pokud to je možné a tyto chyby na výrobku odstranit. Během života daného výrobku, by měl být sledován, jak se chová v daném prostředí a zda je právě v tomto prostředí správně funkční a bezpečný a jestli se nemění jeho pracovní a funkční charakteristiky. K tomu slouží tzv. technická diagnostika.

Technická diagnostika se zabývá zkoumáním momentálního stavu objektů či zařízení na základě vyhodnocení znaků, které mohou ovlivnit jeho budoucí chování či nehodu právě daného zařízení či výrobku. Pokud se chceme zabývat tím, jak by se mohlo zařízení chovat v budoucnu nejedná se už o technickou diagnostiku, ale o technickou pragnostiku, která je mnohem náročnější než samotná diagnostika. Důležité pro diagnostiku je i to, jak se objekt choval v pracovním procesu a co způsobilo to, že je v tomto stavu, ve kterém se momentálně nachází. Toto je také nezbytná součást technické diagnostiky.



Technický stav objektu je jeho samotná charakteristika a schopnost vykonávat práci, na kterou je daný objekt uzpůsoben dle bezpečnostních regulí a podmínek. Pokud se jedná o elektrické zařízení, tak to je vystaveno několika druhům degračních vlivů, které mohou ovlivnit jeho chování z hlediska elektrického tak i mechanického.

Jedná se zejména o: *napětí, termomechanické namáhání a vlivy klimatu, teplota či mechanické namáhání*. Při hodnocení okamžitého stavu zařízení je třeba vycházet že každá součást tohoto zařízení ať už se jedná o izolaci, kluzné kontakt, elektrické kontakty či třeba ložiska je v každém časovém okamžiku definována určitým stavem a určitými vlastnostmi, které mohou být z hlediska bezpečnosti a bezpečnostních regulí nevhodné. Většinou se problémy pouze zhorší vlivem degračních činitelů.

Samotné části, pokud na ně působí degrační vlivy mohou se nenávratně poškodit jak z hlediska mechanického, tak i z hlediska elektrického. Izolace může třeba zuhelnatět či ložiska se mechanicky opotřebí, navlhnutí izolace apod. trvalé i vratné změny vlastností materiálů. Oba druhy změn ať už vratné či nevratné neboli trvalé jsou doprovázeny přechodnými jevy, které se na podepisují na samotné části zařízení.

Samotné metody technické diagnostiky mají stanovit velikost a míru degradace funkčních schopností a vlastností objektu, popřípadě možnost výskytu závad a poruch. Pokud diagnostikujeme systém nebo objekt, můžeme využít několik způsobů, jak k této diagnostice přistupovat:

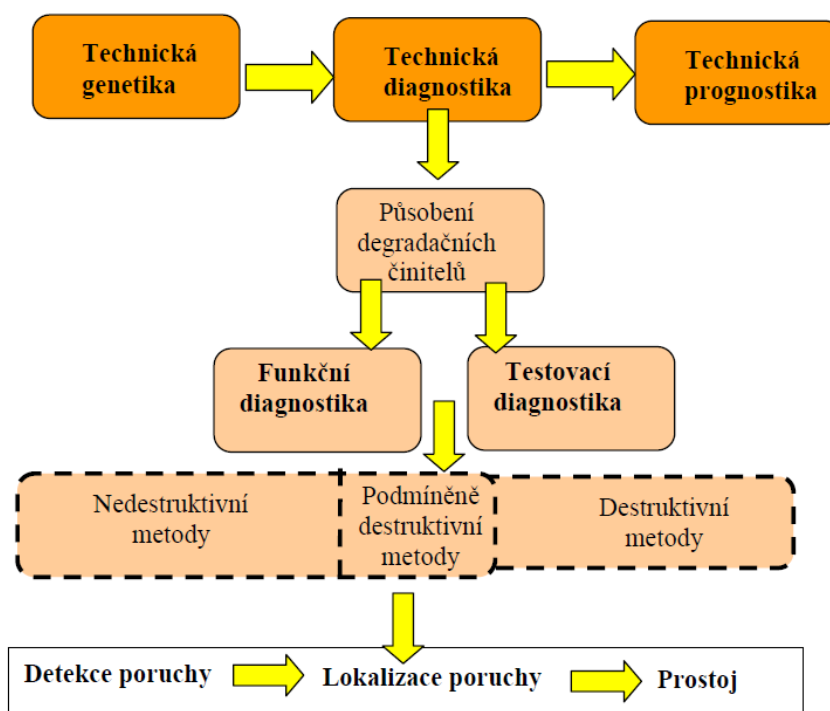
- a) Objekt považujeme za černou skříňku, kde posuzujeme jevovou stránku bez hlubšího zkoumání, přičemž nás nezajímají děje uvnitř. Stav hodnotíme pomocí stochastických signálů, které samotné zařízení generuje, ze kterých určíme funkční vlastnosti daného zařízení. Měření signálů je možno dělat jak spojitě, tak i v určitých časových intervalech na stejných místech za stejných provozních podmínek. Pokud se signál změní z hlediska tvaru nebo intenzity, sděluje nám to změnu stavu daného zařízení. Stav zařízení se dá někdy určit i z jediného měření, které jsme na daném zařízení provedli.
- b) Samotné děje jsou podstata našeho zkoumání a analýzy. Struktura materiálu je pro nás základní poznatek a podle vlastností, které by mělo zařízení v provozu mít určujeme a usuzujeme stav funkčních vlastností daného zařízení. Je logické, že první zkoumáme prvky, ze kterých se zařízení skládá a zdali tyto prvky splňují všechny předpisy a normy, které by měli a mimo to, jestli fungují podle toho, jak by měli fungovat právě v tomto zařízení které analyzujeme. Samozřejmě musíme zkontrolovat i samotné prvky, zda fungují správně, protože jediný špatně fungující prvek dokáže zařízení ovlivnit. Tento postup je zdlouhavější a složitější, protože nemáme k dispozici přesné údaje o každé součásti zařízení a jak by měli fungovat, popřípadě se chovat v daném prostředí. Změnu funkčních vlastností se nám nepodaří určit, pokud si nezvolíme změnu struktury materiálu jak samotného zařízení, tak i samotných prvků, které jsou v zařízení.
- c) Oba výše uvedené způsoby můžeme kombinovat pro nepřesnější výsledek.

Množství metod v technické diagnostice pro zjištění aktuálního stavu a výsledků je mnoho. Tyto výsledky určují to, jak se s daným zařízením bude v budoucnu zacházet. Těžkým úkolem technické diagnostiky je najít propojení mezi měřitelnou veličinou a vlastnostmi daného zařízení. Poté musíme podle míry změny dané měřitelné veličiny usoudit, zda se jedná o změny trvalé nebo vratné a zdali tyto změny jsou mechanického nebo elektrického charakteru.

Nejčastěji využívaný druh technické diagnostiky je funkční diagnostika, kdy sledujeme veličiny přímo v provozu zvoleného zařízení a signály které nám zařízení vygeneruje. Existuje samozřejmě i druhý druh technické diagnostiky a sice testovací diagnostika, která má oproti funkční diagnostice obrovskou nevýhodu v praxi a sice to, že se diagnostikované zařízení odstavit a není možné jej sledovat během pracovního procesu.

Z důvodů pro pracovní proces a náklady upřednostňujeme v diagnostice metody nedestruktivní, které zkoumají samotné zařízení či jeho součást, aniž bychom zničili námi diagnostikované zařízení. Destruktivní metody se využívají tehdy, pokud více stroj má stejné „příznaky“ které nedokážeme nedestruktivní metodou diagnostikovat. Tak se jeden takový stroj diagnostikuje destruktivní metodou, abychom se dozvěděli důvod špatného fungování a mohli to i na ostatních zařízeních opravit. Další druh metody, který je upřednostňován, je bezdemontážní, a to z důvodů časových, aby doba, kdy diagnostikujeme zařízení nebyla tak dlouhá, a navíc u některých zařízení při demontáži můžeme spíše více poškodit.

Pokud nebudeme při diagnostice mít věrohodně informace o stavu a o provozních a funkčních vlastnostech zařízení nemůžeme zjistit spolehlivý provoz diagnostikovaného zařízení. Využitím různých diagnostických metod získáme právě tyto informace, díky kterým můžeme zajistit spolehlivý provoz. Cílem diagnózy je zjištění aktuálního stavu, pokud se budeme zabývat historií jedná se již o technickou genetiku a pokud se budeme zabývat budoucností daného zařízení jedná se už o technickou prognostiku.



Obrázek č.3 Koncepce technické diagnostiky [2]

Cílem diagnostiky je snížení provozních nákladů a ne měření. Samotné měření slouží k tomu, abychom zjistili závadu na zařízení a jestli je vratná či nikoliv. Diagnostika tudíž prodlužuje život

zařízení a určuje nám které opravy zařízení se nám vyplatí či ne. Samotná diagnostika nám pomáhá držet náklady na údržbu, popřípadě nákup nových zařízení co nejnižší.

Součástí technické diagnostiky je jak jsem již výše popsal, shrnutí které degradační vlivy mají na stroj nechtěné účinky. A právě díky tomuto zjištění můžeme do budoucna prognostikovat co by se s daným zařízením mohlo v budoucnu stát na základě diagnostiky pomocí degradačních vlivů, které nám ovlivňují vlastnosti zařízení.

Degradační činitelé nemusí být jediní činitelé co nám mohou znehodnotit nebo poškodit zařízení nebo jeho součást. Může jít také o vlivy a signály které mohou znehodnotit či dočasně poškodit funkčnost a bezpečné fungování daného zařízení, což může způsobit přerušení provozu, aniž by to mohlo poškodit mechanickou či elektrickou část zařízení. Po odstranění tohoto vlivu by mělo zařízení zase fungovat bezpečně a efektivně jako předtím.

V určitých průmyslových oblastech narůstá počet elektrických silových zařízení např. v průmyslu hornických, informačních, dopravních, telekomunikačních či jiných průmyslových odvětvích. Narůstá počet silových elektrických zařízení a elektronických zařízení v domácnostech, a to jak ve sdělovací technice nebo ovládací či zabezpečovací technice, které se navzájem dokážou ovlivňovat a tím dokážou způsobit havárii, výpadky nebo poruchy provozní sítě. Navzájem se ovlivňují pomocí elektromagnetického působení těchto systémů a rozvodů na sebe. Citlivé elektronické systémy bývají nenávratně poškozeny nebo ovlivněny právě elektromagnetických působením silovými elektrickými zařízeními. Proto musíme dbát, aby příslušná technika byla navzájem v elektromagnetické kompatibilitě neboli snášenlivosti.

Zařízení se mohou navzájem ovlivňovat, tudíž nejen, že ovlivňují jiné zařízení, ale mohou být sami ovlivňovány. Důvod tohoto ovlivňování můžou být i spínací, popřípadě vypínací přechodné děje, které mohou odebírat ze sítě velké proudy, popřípadě systémy, které mohou svou samotnou funkcí ovlivňovat jiné zařízení. Pomocí metod technické diagnostiky bychom měli být schopni toto ovlivňování zjistit, i když se jedná o náhodné signály. Příklad takového rušivého zařízení může být statický měnič frekvence.

Pomáháme pomocí diagnostiky určovat hranice rizika, která je ještě únosná, jak již bylo uvedeno v předcházející části.

### **5.2.1 Prognostický proces**

Prognostický proces je složen z:

- Zpracování předem (provedení diagnózy, vlivy na poruchu, způsoby poruchy apod.),
- Prognóza způsobu poruchy (ohodnocení závažnosti, trend všech parametrů do poruchy apod.),
- prognózu budoucího stavu po poruše (akce, které vyloučí budoucí poruchu).

System musí zahrnout hodnocení vlivů, které souvisí s:

- historii údržby,
- hodnocením způsobu poruchy,
- intervalem měření,
- sběrem dat,
- hodnocením závažnosti,
- hodnocením trendů, - diagnostickým procesem, - zatěžovacím procesem. [2]

### **5.2.2 Poruchy a jejich zjišťování**

Porucha jako taková je schopnost vypnout nebo ukončit danou funkci.

Pokud se nějaká ze složek nebo schopností zařízení zhorší nebo začne vykazovat abnormální chování, které by mohlo způsobit poruchu nazýváme tento stav závada. Může být, ale nemusí důsledek poruchy, což je většinou obvyklé.

Závada není brána jako událost, ale jako stav narozdíl od poruchy – ČSN ISO 13381-1

Skupina podmínek, které se vyskytnou na začátku události, které mohou mít za následek vznik poruchy je označena jako základní příčina.

Vjem, který je vnímán pozorováním je příznak. Tento příznak může indikovat přítomnost více závad, popřípadě jedné závady s určitou procentuální šancí.

Vznik a postup poruch může ovlivnit technický stav a funkční způsobilost objektu či zařízení. O chování měřených veličin nás informuje technická diagnostika, musí nás včas upozornit na abnormální chování či vlastnosti stroje, popřípadě na neobvyklé poruchy v jeho okolí, které by ho mohli určitým způsobem ovlivnit a upozornit na blížící se poruchu, abychom ji mohli předejít. Pokud dostaneme tyto informace o rozvíjející se poruše, můžeme zařízení odstavit a opravit do stavu, kdy se poruše vyhneme, aby nebyla ještě rozsáhlejší a nezpůsobila havárii. Pokud diagnostika nezaznamená tyto informace, můžeme tuto informaci zjistit zpětně na porouchaném zařízení.

Detekce poruchy, je velice důležitá, kvůli rozlišení bezporuchového a poruchového stavu. Nejedná se o určení druhu poruchy ani o bližší měření poruchového stavu. Po samotné detekci, obvykle následuje její bližší určení, kde se porucha nachází, v jakém rozsahu a jakým způsobem a jestli vůbec je opravitelná.

Nejdříve při rozborech, je nutné určit poruchu prvotní a poté poruchy druhotné, které vznikly právě díky prvotní poruše, která způsobila nevhodné nebo degradační prostředí pro ostatní součásti zařízení a mohla být jako příčina pro druhotné poruchy.

### **5.2.3 Metody technické diagnostiky**

Provozní diagnostika funguje na principu zpracování a uchování dat, včetně samotného měření, pomocí kterého posuzujeme aktuální funkční stav objektů. Podmínky provozní by měli být zachovány, pro správný chod a správnou diagnostiku daného zařízení nebo objektu. Tyto data se shromažďují

do databází a zkoumá se v nich geneze daného zařízení či objektu. V této genezi jsou zkoumány průběhy vlastností systému nebo prvku a podle těchto informací lze zpracovat prognózu, neboli co by se mělo stát, kdyby se poruchy objevovali, podle určitého vzorce, ale dá se tak zjistit i vývoj chování vlastností.

Při využití funkční diagnostiky a při spojitém sledování zařízení měříme elektrické mechanické a magnetické veličiny přiváděné na zařízení což je proud a napětí. Nebo veličiny které nám diagnostikované zařízení produkuje jako je rozptylový magnetický tok, hluk, vibrace, hřídelová napětí nebo teplota. Tyto veličiny jsou většinou závislé na čase, ale také třeba nesymetrií, špatnou izolací, chybným uložením či ustavením, stavem ložisek nebo třeba přímo výrobní vadou. A díky této závislosti, můžeme udělat analýzu jednotlivých částí, podle toho co kde naměříme neobvyklého.

Tyto veličiny nám sdělují nepřímou stav funkčních vlastností a stav mechanický a pracovní, souvislosti mezi těmito veličinami a stavy je prokazatelná, protože jsou tyto veličiny snadno měřitelné tak jsou vhodné pro spojitě sledování právě pracovních a funkčních vlastností daného elektrického zařízení. Samotné metody jsou hodnoceny použitelností a vhodností a sice takto:

- Není nutná demontáž zařízení
- Provozní odstávky nejsou nutné
- Vyhneme se složitějším měřicími metodám
- Speciální zařízení není potřeba ani kvůli vytvoření měřených veličin
- Jsou nedestruktivní, tudíž neohrožují zařízení

Jedná se o metody nedestruktivní a s jejich použitím není spojeno přidavné namáhání jakékoliv části zařízení. Nejčastěji se využívá dvou na sobě nezávislých metod a následné porovnání výsledků jednotlivých metod, zdali se shodují či nikoliv. Pokud se výsledky obou metod alespoň v nějaké věci shodují stoupá věrohodnost naší diagnostiky, protože danou poruchu nebo závadu máme prokázanou hned dvěma metodami.

Pokud budeme měřit magnetické pole statoru a proud, který statorem prochází, při různých zatěžovacích stavech, získáme proudové a napěťové spektrum ve kterém uvidíme spoustu harmonických i subharmonických ať už se jedná o primární harmonickou popřípadě o vyšší harmonické. Poté je na nás abychom posoudili harmonické stroji přirozené a harmonické, které jsou způsobeny poruchou nebo závadou zařízení.

#### **5.2.4 Diagnostikované součásti zařízení**

Elektrické zařízení se skládá z mnoha částí, které lze kontrolovat pomocí různých veličin ať už mechanických, či elektrických a tyto části jsou:

- Magnetický obvod
- Ložiska
- Kostra a štíty
- Spoje a spojovací vodiče
- Hřídel
- Komutátory nebo kroužky a kartáče
- Přídavná zařízení (filtry, ventilátory atd.)
- Izolace

- Sběrné ústrojí
- Svorkovnice

Nejvíce poruch nastává v izolaci, hřídel, ložiska nebo komutátor. Na tyto části zařízení se také nejčastěji zaměřujeme.

### 5.2.5 Časté závady elektrických zařízení a projevy s nimi spojené

Pokud se jedná o elektrický stroj točivý, tak zde se vyskytují závady nejčastěji na těchto částech:

- Magnetický obvod statoru nebo rotoru
- Vinutí statoru nebo rotoru
- Hřídel, kostra nebo jiné mechanické součásti

### 5.2.6 Provozní diagnostika asynchronních strojů

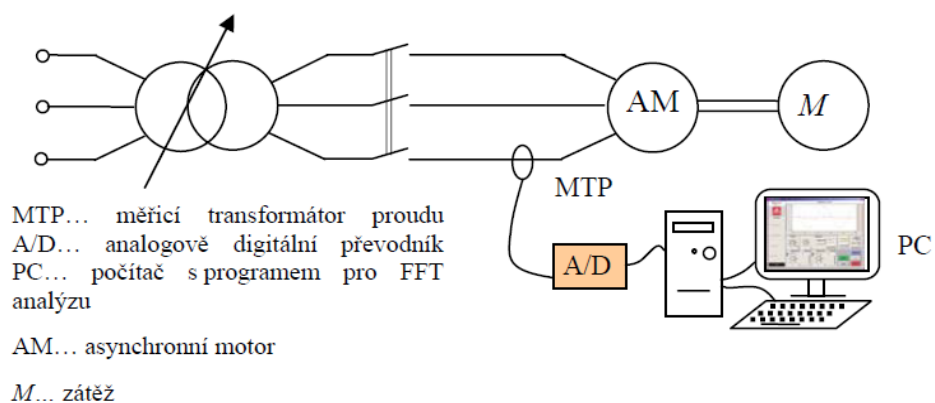
Asynchronní stroje patří mezi nejrozšířenější elektrické stroje vůbec. V nedávné době se začínají využívat i jako generátory i když se do této doby využívali v motorickém režimu. Proto si rozebereme diagnostiku těchto strojů.

Pokud budeme diagnostikovat pomocí statorového proudu, je výhodné to, že můžeme diagnostikovat, aniž bychom narušili výrobní proces. Není tudíž nutno motor jakkoliv odstavovat nebo rozebírat a tím zastavit provoz tohoto stroje. Nejčastěji se volí nejjednodušší metoda a sice měření s klešťovým ampérmetrem nebo čidlo pracující na základě Hallova jevu atd. Poté je většinou potřeba počítač, frekvenční analyzátor a převodník s výstupem napětí 5V.

Při tomto měření můžeme zjistit tyto poruchy či závady:

- Poruchy vinutí rotoru
- Mechanické závady stroje
- Vadné ustavení stroje
- Nebo mechanické závady na převodovce, která je na stroj připojena

Typické pro tyto závady jsou postranní pásma základní frekvence, kterou napájíme daný stroj.



Obrázek č.4 Způsob diagnostického měření statorového proudu u asynchronního stroje [2]

### **5.2.7 Přerušení rotorové tyče asynchronního motoru**

Jednotlivé rotorové fáze, mají každá svou rotorovou tyč, která je zde místo vynutí. V těchto tyčích se nám indukuje napětí, díky kterému nám vzniknou proudy, které nám vytvoří vícefázový symetrický elektrický systém. Každá tyč je odlišná od jiné rotorové tyče, můžou mít třeba odlišné hodnoty elektrického odporu.

Krajním a právě mým případem je přerušení jedné či více rotorových tyčí, popřípadě samotného kruhu. Toto přerušení tyčí, neboli vinutí se projeví, nesymetrií rotorového pole a také špatnými pracovními vlastnostmi daného stroje ať už parazitními momenty nebo neobvyklým zahříváním zbytku nepoškozeného vinutí.

Nesymetrie magnetického pole se dá zjistit pomocí snímání z vnější strany stroje. V mém případě jsem použil cívku, kterou jsem položil na kostru motoru a přes USB osciloskop šel signál do počítače, který jsem snímal v programu TiePie a kde jsem vykreslil ze signálu tzv. rychlou Fourierovu transformaci jinak řečeno FFT frekvenční zastoupení.

## 6 Porovnání poškozeného a nepoškozeného motoru

Využil jsem právě změny magnetického pole, abych dokázal funkčnost této metody v praxi. Porovnal jsem dva totožné elektrické motory, jeden jsem rozebral a provrtal skrz rotorovou tyč, abych mohl porovnat právě FFT analýzu těchto dvou motorů a zdali bude odpovídat teorie, která je popsána v mnoha článcích s praxí. U poškozeného motoru by měly být zvýrazněné parazitní frekvence u základní frekvence i u vyšších harmonických. Porovnával jsem tyto motory ve stejných otáčkách. Vybral jsem jmenovité otáčky 1425 poté 1450 a 1475. Oba motory měli stejné otáčky a průběhy využité v FFT analýze jsou ustálené.

### 6.1.1 FFT analýza

V praxi je často výhodné (teoreticky i experimentálně) používat harmonických funkcí  $\exp(i\omega t)$ , neboť jsou snadno prakticky realizovatelné (resp. jejich imaginární či reálná část) a mají výhodné matematické vlastnosti (zvláště vzhledem k derivaci a integrování). Ukazuje se, že za dosti širokých podmínek lze každou funkci vyjádřit jako součet či integraci harmonických funkcí, ovšem každé s jinou váhou a fázovým posuvem (zpravidla jsou obě hodnoty zahrnuty do komplexní váhové funkce). Váhová funkce tedy udává, jaké frekvence  $\omega$  je nutno použít v superpozici, aby bylo možno z harmonických funkcí zpětně sestavit původní funkci. Právě tato váhová funkce (spektrum) bývá označována jako (trigonometrická) Fourierova transformace (FT). Definiční vzorec pro FT je integrálem a pro praktickou realizaci není příliš vhodný:

- jeho analytické řešení existuje jen v omezeném počtu případů a je nutno jej tedy řešit numericky (tedy přechodem nekonečný integrál  $\rightarrow$  konečná sumace),
- v případě počítačového zpracování nemáme spojitou funkci, ale jen její hodnoty v diskrétních vzorkovacích okamžicích.

Z těchto důvodů se definuje diskrétní Fourierova transformace (DFT), která je již polynomem a jejími vstupy a výstupy jsou posloupnosti hodnot. Nevýhodou této definice je její značná časová náročnost, která roste se čtvercem délky vstupní posloupnosti. Proto byl vypracován algoritmus, který vychází z vlastností exponenciálních diskrétních funkcí a výrazně snižuje potřebnou dobu výpočtu. Tento algoritmus je zvykem nazývat rychlá Fourierova transformace (FFT – Fast Fourier Transform). Fourierova transformace se ukázala být účinnou metodou zpracování různých signálů. Často je využíváno její vlastnosti převodu konvoluce na násobení, což umožňuje u některých soustav zavést tzv. přenosovou (frekvenční) funkci, která vhodným způsobem charakterizuje dynamické vlastnosti soustavy. Metoda umožňuje provádět frekvenční filtraci, tedy odstraňovat ze signálu části s různými frekvencemi, což může např. snížit úroveň šumu v signálu. Operace ve frekvenční oblasti mohou upravovat obrazy takovým způsobem, aby např. došlo ke zvýraznění hran, k odstranění „proužkování“ či ke zvýraznění některých struktur v obraze. Výrazným uplatněním FT je také skutečnost, že mnohé fyzikální jevy mohou být aproximovány právě Fourierovou transformací. V optice se jedná o jevy difrakce v tzv. Fraunhoferově aproximaci, zobrazení tenkou čočkou do ohniskové roviny a další. Zde umožňuje FFT výrazné zjednodušení práce, neboť není třeba sestavovat optické aparatury, ale stačí pouze použít kameru a nasnímat např. difrakční clonu. Tento způsob navíc umožňuje snadnou archivaci výsledků a další zpracování obrazu počítačem. [3]



### 6.1.2 Analýza poruch motoru

Tato analýza probíhá za pomoci FFT analýzy napájecího proudu nebo indukovaného napětí v cívice, která zachytává externí rozptylové pole motoru. V cívice se indukuje napětí, které snímáme přes USB osciloskop TiePie Handyscope HS3 Oscilloscope do počítače, kde vyhodnocujeme pomocí softwaru TiePie, kde se nám vykreslí průběh napětí indukovaného ve snímací cívice, ale i vyšší harmonické, podle kterých právě jsme schopni zjistit a identifikovat závadu. V mém případě se jedná o přerušenou rotorovou tyč.

Pokud je motor porouchaný, tak se vytvoří nové magnetické rozptylové pole, které se projeví na hlavním rozptylovém poli a cyklicky ho naruší, což můžeme pozorovat na vyšších harmonických a že v okolí hlavní a vyšších harmonických vzniknou parazitní frekvence, způsobené právě danou poruchou stroje. Tato nerovnoměrnost působí samozřejmě i na magnetické pole statoru což nám právě vytvoří tyto parazitní frekvence. Tyto frekvence musíme od napájecí frekvence a jejich násobků oddělit, abychom mohli podle tohoto určit o kterou poruchu se jedná a zda je ji možné vyřešit, nebo je motor na odpis.

Tyto frekvence jsou vyjádřeny vztahem, ve kterém je vidět závislost na napájecí frekvenci a skluzu daného asynchronního motoru:

$$f_v = f_1(1 - 2s) = 50(1 - 0,05) = 47,5 \text{ Hz} \quad (2)$$

Tyto frekvence jsou právě specifické pro danou závadu a díky asymetrii, můžeme zjistit co motoru je. Ovšem musíme také počítat s tím, že motor není vždy sestaven dokonale a může být rotor mírně prověšen, či ložiska se mohou třeba zahřívat více, ale přesto můžou tyto motory projít přes výstupní kontrolu. Právě většina těchto frekvencí je způsobena konstrukcí a mírnou excentricitou.

Frekvence drážek statoru:

$$f_v = f_1 \left( \frac{Z_s}{p} \pm 1 \right) = 50 \left( \frac{28}{2} - 1 \right) = 650 \text{ Hz} \quad (3)$$

Frekvence drážek rotoru:

$$f_v = f_1 \left[ \frac{Z_R(1-s)}{p} \pm 1 \right] = 50 \left[ \frac{28(1-0,05)}{2} - 1 \right] = 615 \text{ Hz} \quad (4)$$

$$f_v = \frac{f_1}{p} (1 - s)(Z_R \pm p) = \frac{50}{2} (1 - 0,05)(28 - 2) = 617,5 \text{ Hz} \quad (5)$$

Frekvence generována statickou a dynamickou excentricitou:

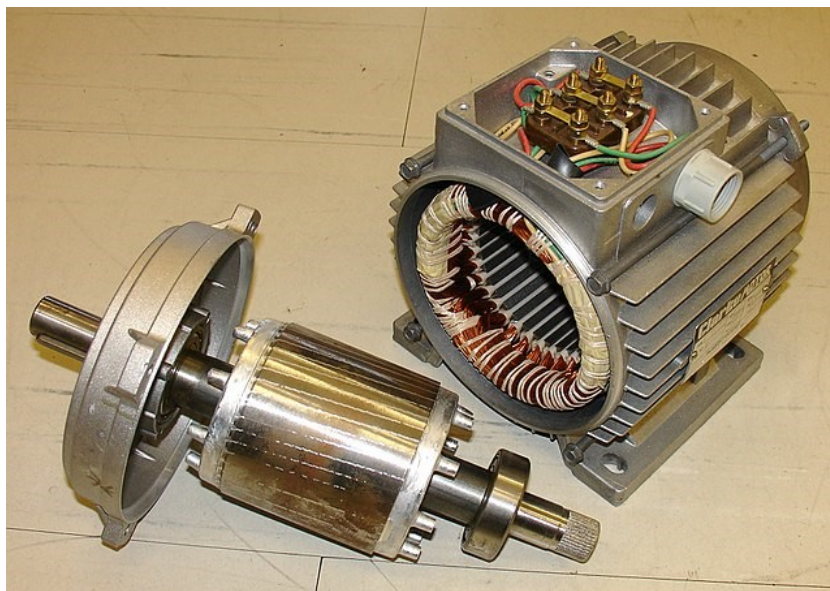
$$f_v = f_1 \left[ (k \cdot Z_R \pm n_d) \cdot \frac{1-s}{p} \pm n_x \right] \quad (6)$$

$$f_d = f_1 \left( \pm n \cdot \frac{1-s}{p} + 1 \right) \quad (7)$$

Frekvenční analýza proudu nebo rozptylového pole může být využita jako diagnostika obou rotorových elektrických asymetrií nebo jiných poruch například mechanických asymetrií, excentricita rotoru, popřípadě nesprávná montáž.

### 6.1.3 Zjištění počtu rotorových tyčí

Jeden z nejdůležitějších parametrů je počet rotorových tyčí  $Z_R$ . Protože právě z toho dokážeme zjistit o jakou poruchu se jedná, jestli je přerušena rotorová tyč jako v mém případě nebo právě třeba excentricita. Obvykle tuto hodnotu neznáme, protože běžně není uvedena na štítku stroje a díky dnešní technologii hladkého rotoru již není možné od pohledu poznat kolik je v daném stroji rotorových tyčí jako dříve, kdy byli drážky vidět.



*Obrázek č.5 Obrázek nehladkého rotoru a statoru. [4]*



*Obrázek č.6 Hladký rotor asynchronního motoru [5]*

Pro zjištění množství rotorových tyčí se využívá FFT analýza rozptylového pole v radiálním směru. I přes skutečnost, že se tato analýza pro zjištění počtu rotorových tyčí zdá jednoduchá, tak se tak opravdu pouze zdá. Hledání elementární frekvence počtu rotorových tyčí je opravdu těžká záležitost.

Obvykle se elementární frekvence nachází vysoko nad základní napájecí frekvencí 50 Hz. A obvykle se nachází mezi 100Hz a 1 kHz. Také díky přesnosti měření otáček se odrazí v přesnost v odhad počtu rotorových tyčí.

#### 6.1.4 Měření počtu rotorových tyčí

Pro zjištění této hodnoty jsem také využil USB osciloskop TiePie Handyscope HS3 Oscilloscope a externí cívku, která byla přiložena u boku kostry asynchronního motoru. Jedná se o třífázový motor se specifikacemi  $P_N=2,2$  kW,  $U_n=400/230$  Y/D,  $2p=4$ ,  $n_n=1425$  min<sup>-1</sup>,  $I_n=4,9$  A,  $\cos\varphi=0,81$ . Pro analýzu a uložení dat byl použit počítač. Naše cívka, která byla použita pro měření má parametry  $D_{IN}=35$  mm a  $N_{COIL}=2500$  otáček, ale počet těchto otáček, není až tak pro tuto analýzu důležitý.

Měřili jsme touto cívku harmonické při otáčkách 1425, 1450 a 1475, zatížení motoru nám dělal dynamometr. Protože otáčky 1425 jsou pro tento motor jmenovité je tato elementární frekvence nejvýraznější a při těchto jmenovitých otáčkách jsme ji našli na hodnotě 615 Hz. A při otáčkách 1475 se nám tato frekvence zmenšila a posunula na 637 Hz.

Obvykle se právě měří na třech různých zatíženích, abychom mohli porovnat výsledky v případě, že bychom někde udělali chybu. Počet rotorových tyčí lze vypočítat pomocí vztahu do kterého si i rovnou tyto hodnoty dosadíme:

$$Z_R = \frac{p(f_v \pm f_1)}{f_1(1-s)} = \frac{2(614+50)}{50(1-0,05)} = 27,96 \quad (8)$$

Nevyšlo nám přesně celé číslo, ale to může být chybou měření, popřípadě napájecí frekvence nemusela být přesně rovna 50 Hz, ale je to velice blízko celému číslu, takže můžeme s přesností určit, že motor má tedy 28 rotorových tyčí.

Další metody zjištění počtu rotorových tyčí, také potřebují FFT analýzu, ale dá se využít i SFFT neboli krátká rychlá Fourierova transformace. Kde samozřejmě i díky skluzu dojdeme ke stejnému výsledku, jako v metodě kterou jsem použil.

Otáčky motoru [min <sup>-1</sup> ]	Měřené a vypočtené hodnoty			
	Skluz [%]	Změřená frekvence [Hz]	Počet rotorových tyčí ze vzorce [-]	Zaokrouhleno
1425	5	615	27,96	28
1450	3,33	625	27,93	28
1475	1,67	637	27,94	28

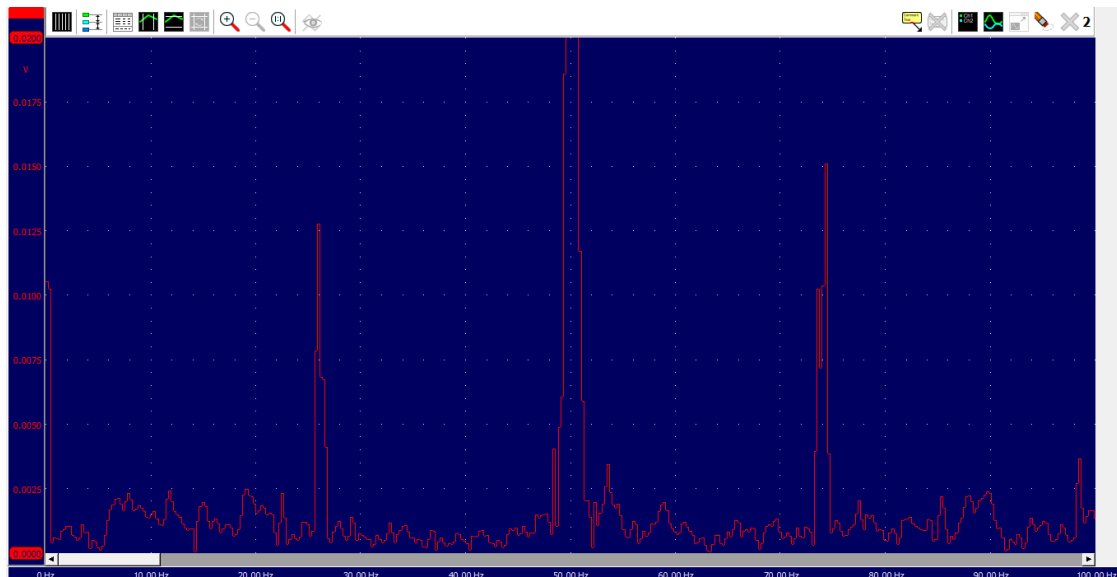
Tabulka č.1 Hodnoty změřené či vypočtené ze vzorce

#### 6.1.5 Měření prasklé rotorové tyče

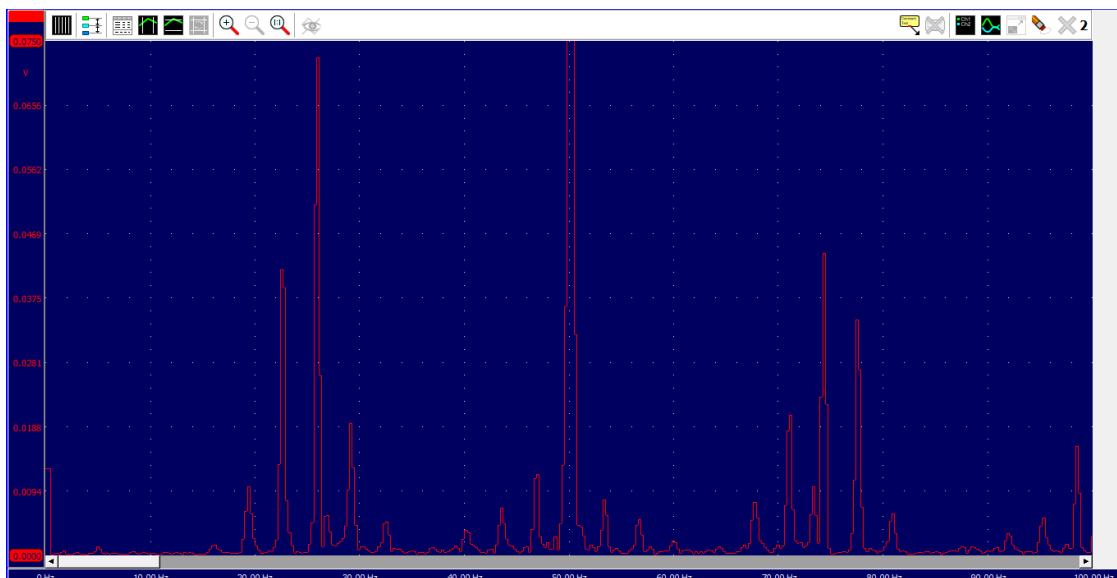
Když už byl motor změřen a rozebrán, tak jsem vytáhnul rotor tohoto stroje a provrtal jsem jednu z rotorových tyčí, hned vedle kruhu. Takto zničená rotorová tyč, je neopravitelná. Protože se jedná už o hladký rotor musel jsem zvolit správné natočení, abych opravdu provrtal rotorovou tyč. Tento motor

jsme využili právě k diagnostice tohoto motoru, s tím že víme tedy, co je na tomto motoru špatně a víme tedy co přesně máme hledat a jak by se to na něj mělo projevit.

Díky této úpravě tohoto motoru zde vznikla nesouosost motorové kostry a štítu samotného motoru i ložisek. Poté co se motor kompletoval, byl opět zapojen a na hřídel byl napojen dynamometr, abychom mohli měření uskutečnit. Tyto změny které, způsobila naše úpravy jsou nádherně vidět v softwaru TiePie, kde jsme prováděli FFT analýzu.



*Obrázek č.7 FFT analýza nepoškozeného motoru při 1450 otáčkách*



*Obrázek č.8 FFT analýza poškozeného motoru při 1450 otáčkách*

Na těchto dvou obrázcích je názorně vidět rozdíl právě funkčního nepoškozeného a poškozeného motoru už na množství parazitních frekvencí, které oproti funkčnímu nepoškozenému rotoru jsou v řádech od 10mV až do 75mV a to jen v rozsahu do 100Hz. Oproti tomu nepoškozený motor nemá tyto parazitní frekvence a pokud se jedná o frekvence excentricity tak jsou oproti 75mV

v řádech do 20mV, což znamená že o více než třetinu menší. Toto se může znatelně projevit na provozu motoru a právě proto využíváme tuto metodu, protože je snadná a poměrně rychlá a rozdíl je znát na první pohled právě na výskytu parazitních frekvencí díky excentricitě rotoru, díky narušené rotorové tyči, která způsobuje i vyšší zatěžování nepoškozených rotorových tyčí.

#### **6.1.6 Modelování a simulace pomocí numerických metod**

Místo FFT analýzy lze simulovat tuto závadu a následky této závady i díky numerických metod, které nám pomůžou vypočítat parazitní frekvence a obecně charakteristiky, které se tímto poškozením změní.

### **6.2 Měření dvou motorů o stejných parametrech**

Tato bakalářská práce je založena na diagnostice asynchronního motoru. Aby tato práce mohla být shledána za průkaznou. Změřil jsem dva totožné motory, z nichž jeden jsem poškodil, aby vznikla závada, kterou budu moci diagnostikovat a druhý motor nám slouží jako porovnání, aby bylo zřetelné, jak vypadají charakteristiky nepoškozeného a poškozeného motoru.

Motory ve své podstatě mají stejné štičkové parametry, ale protože konstrukce motoru, není lehká záležitost, je zde vždy malá odlišnost, protože se nikdy nevyrobí dva naprosto totožné motory, co se budou za každých okolností chovat stejně.

#### **Nepoškozený motor**

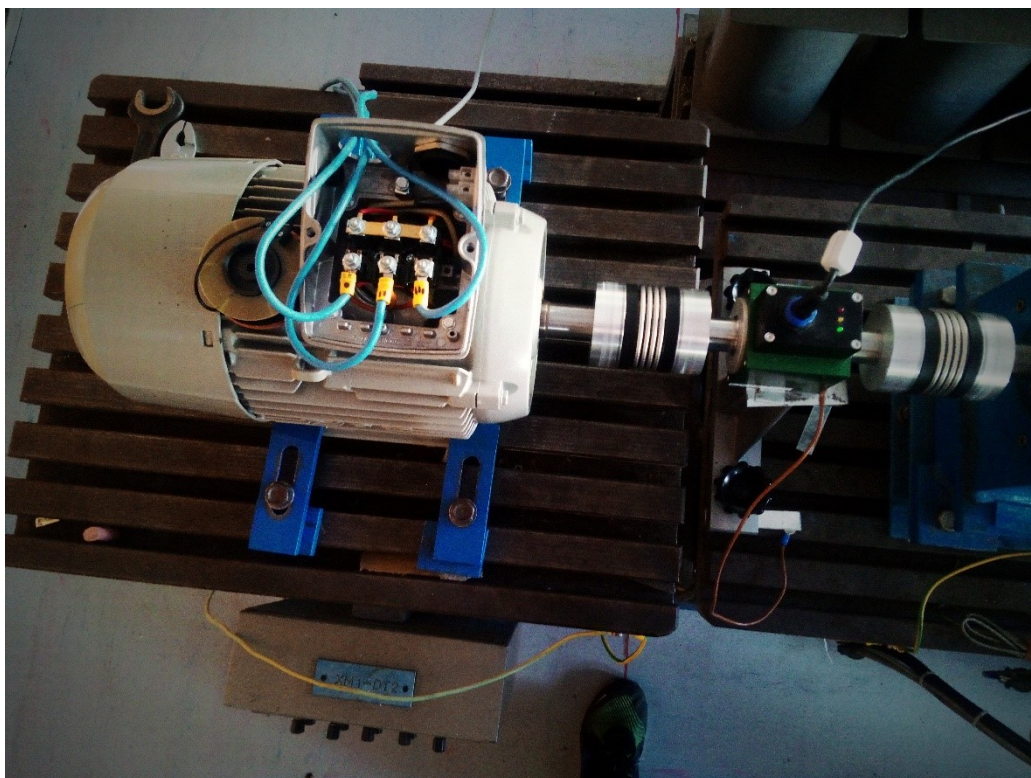
Nepoškozený motor je využíván jak pro měření v předmětu elektrických strojů I tak i měření třeba i závěrečných prací. Jedná se o motor SIEMENS, který je trojfázový a specifikace jsou i výše. Motor má klec nakrátko a jeho charakteristiky jsem tedy použil k porovnání stejného motoru, ve kterém jsem porušil rotorovou tyč. Tento motor byl napojen na dynamometr, který fungoval jako zatížení, abychom mohli korigovat díky dynamometru otáčky motoru a tím i výkon na hřídeli, abychom mohli porovnat s poškozeným motorem ve stejných otáčkách a ve stejném zatížení na hřídeli a aby bylo znát jak se mění parazitní frekvence ve zdravém motoru při různém zatížení a tím můžeme určit jeho excentricity způsobenou drobnou nepřesností při výrobě a nebo při sestavování daného motoru, který by měl odpovídat motoru, který jsem poškodil.

#### **Poškozený motor**

Poškozený motor, jak jsem již psal, je podle štítku totožný s nepoškozeným, ovšem je zde odlišnost právě v provrtání rotorové tyče. Stejně jako nepoškozený motor jsem zatěžoval i tento poškozený a vynikly mi v FFT analýze znatelně parazitní frekvence, které byly řádově mnohem vyšší než u nepoškozeného rotoru, kde byli způsobeny drobnou excentricitou rotoru, ale v tomto poškozeném jsou způsobeny nesymetrickým elektromagnetickým polem, které vzniklo porušením jedné z 28 rotorových tyčí a tudíž, naše pole rotoru nebude symetrické stejně jako zatížení rotorových tyčí v rotoru tohoto poškozeného motoru. Tudíž musíme z FFT analýzy zjistit, které frekvence jsou způsobeny excentricitou při sestavování nebo konstrukci motoru a které vadnou tyčí, popřípadě jestli se nepřekrývají a nezvyšují jeho napěťovou hodnotu.



### 6.2.1 Fotodokumentace měření



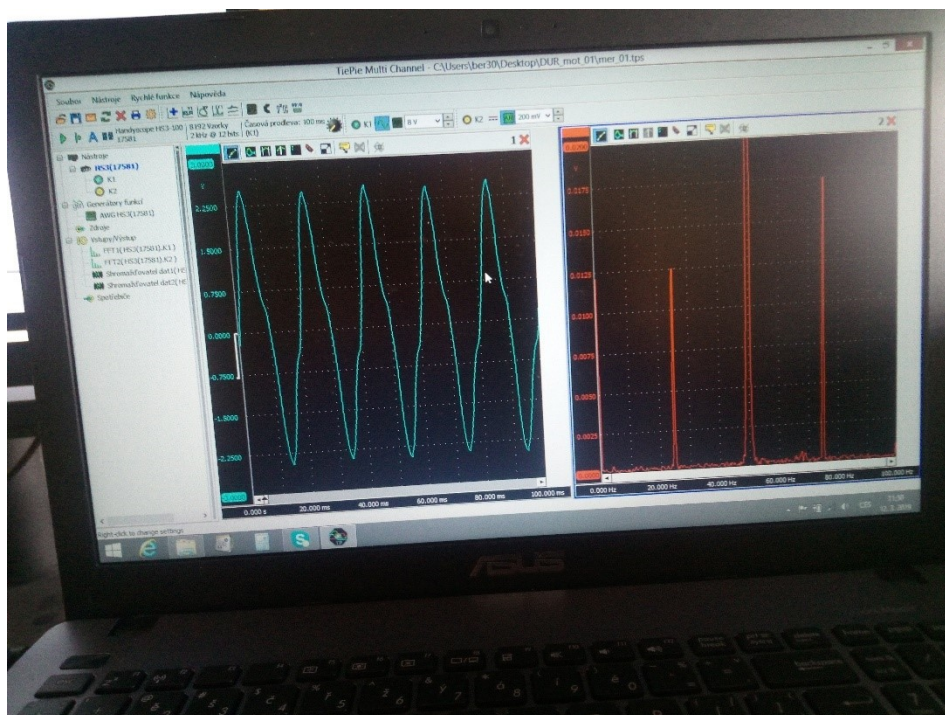
*Obrázek č.9 Zapojení napájení na motoru a umístění sledovací cívky, napojení motoru na dynamometr přes spojku*



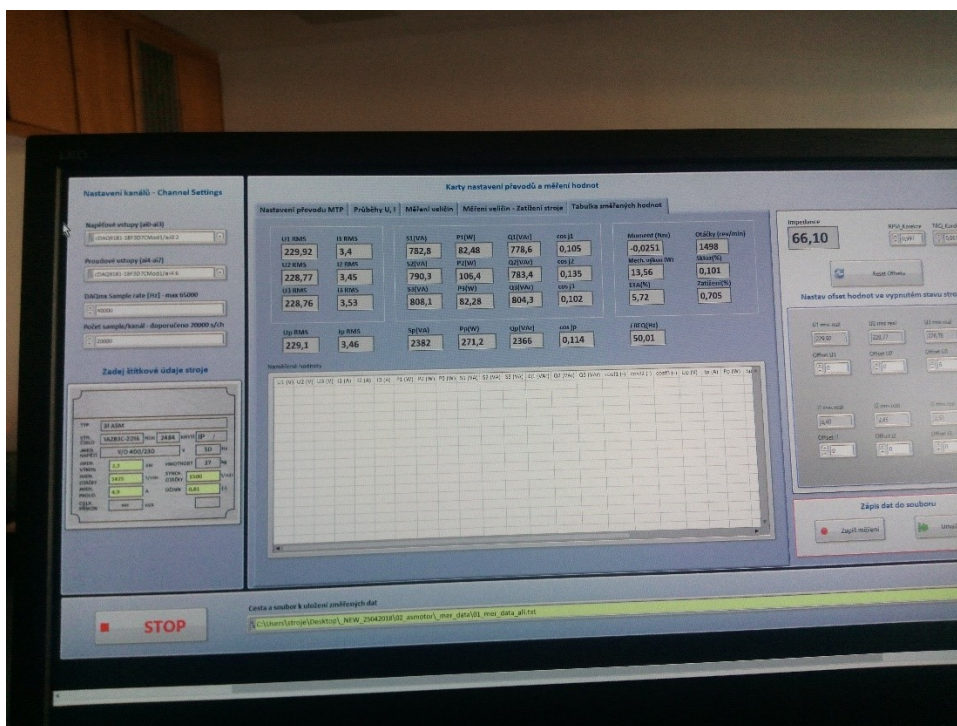
*Obrázek č.10 Nepoškozený asynchronní motor a umístění sledovací cívka*



Na obrázku č.9 a č.10 můžeme vidět nepoškozený motor a jeho připojení na napájení. Dále je na obou obrázcích vidět i napojení motoru na dynamometr, který tvořil zátěž, ale také umístění sledovací cívky, která snímala elektromagnetické pole, které jsme přes USB osciloskop vyhodnocovali na PC.



Obrázek č.11 Počítač na kterém se pomocí softwaru TiePie vyhodnocovala FFT analýza



Obrázek č.12 Počítač s programem LabView, pro sledování veličin motoru

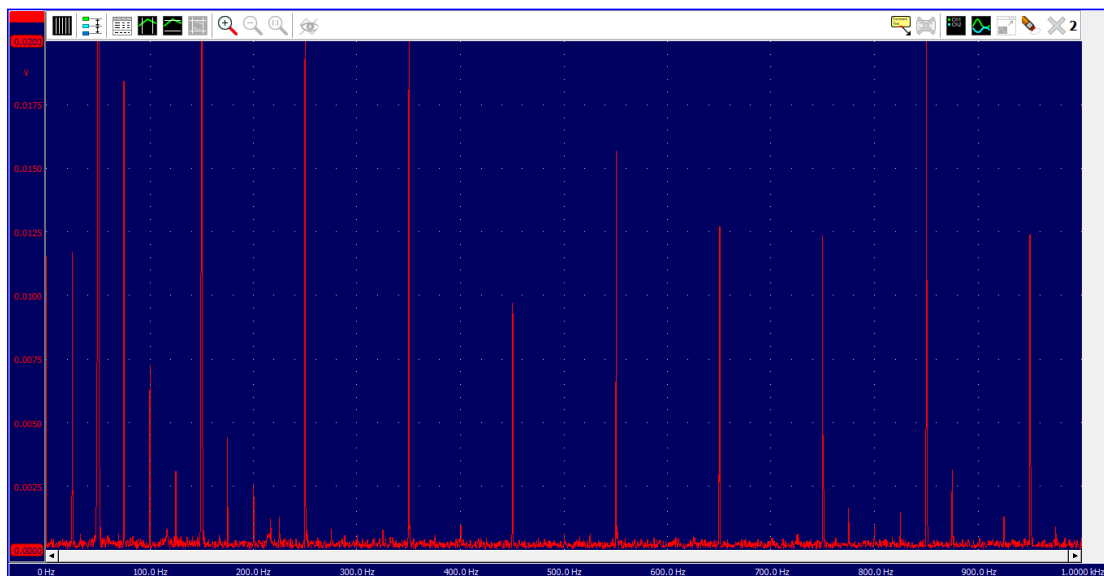
Na obrázcích č.11 a č.12 jsou vidět monitory počítačů, na kterých je zobrazen software, který jsme využívali k diagnostice obou motorů.

Na obrázku č.11 je vidět software TiePie, kde levý graf znázorňuje průběh napětí ve sledované cívce. Pravý graf na obrázku č.11 znázorňuje už FFT analýzu, kde jsou vidět základní napájecí frekvence a i parazitní. Pravý graf lze upravovat, podle toho co potřebujeme z grafu vyčistit, lze vyčistit šum, který je na grafu znát pomocí převedení napětíového zastoupení frekvence na dB. Já jsem tuto možnost nevyužil, protože parazitní frekvence jsou i s tímto šumem dobře viditelné a není třeba tento šum tlumit.

Na obrázku č.12 vidíme zapnutý program LabView při měření našeho asynchronního motoru. Tento program dostává informace z měřicích karet, které jsou umístěny v proudových trafech, kterými jsme měřili každou fázi a proud v ní, ale také sledoval napětí mezi fázemi i samotné fáze vůči zemi. Díky komplexnosti tohoto programu, jsme v něm mohli sledovat průběhy výkonu, zatížení, moment na hřídeli, skluz, zdánlivý výkon, účinnost nebo třeba otáčky. Právě díky LabView jsme korigovali otáčky motoru, abychom je mohli porovnat ve stavu stejného zatížení. Protože se jedná o asynchronní motor, tak otáčky samozřejmě trefit přesně téměř nejde, proto se mi stalo, že třeba místo žádaných 1425 otáček jsme měli 1426 popřípadě 1424. Tento rozdíl, by se neměl nijak výrazně v analýze projevit, maximálně se nám posune frekvence z 615 Hz na jinou frekvenci, velice blízkou vypočítané hodnotě.

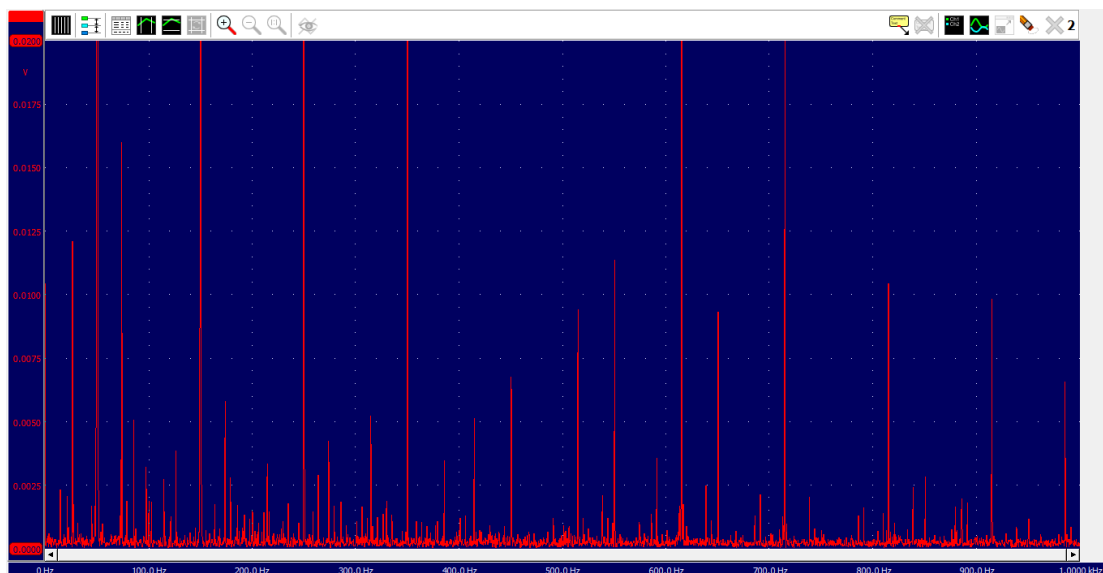
### 6.2.2 FFT analýza nepoškozeného motoru

Nepoškozený motor byl tedy snímán při otáčkách naprázdno, kde nelze poznat téměř rozdíl mezi poškozenou a nepoškozenou charakteristikou. Dále byl motor analyzován při otáčkách jmenovitých, tedy 1425 dále 1450 a 1475.

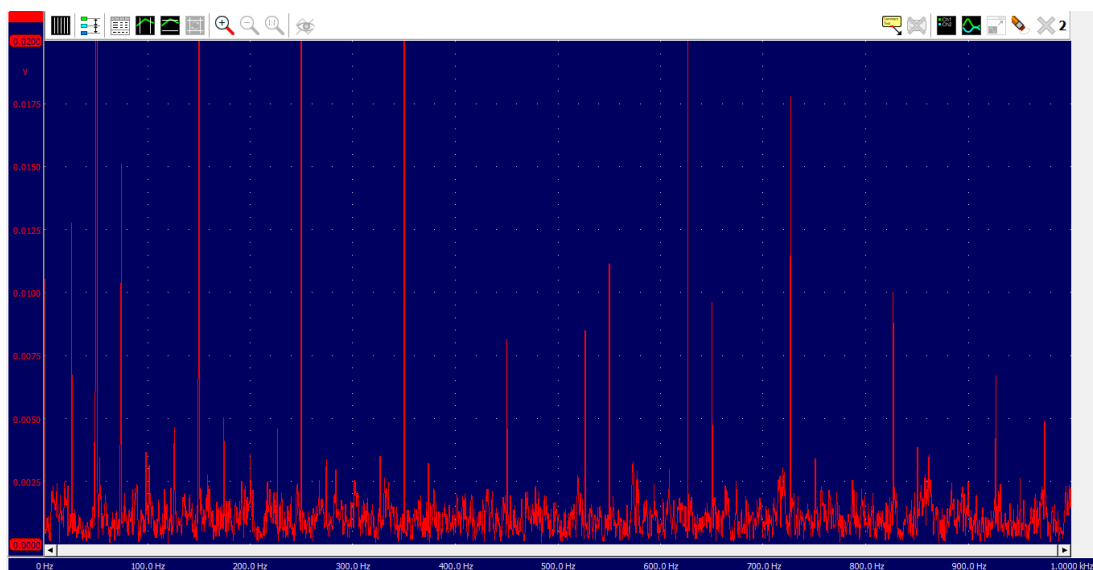


Obrázek č.13 FFT analýza nepoškozeného motoru naprázdno

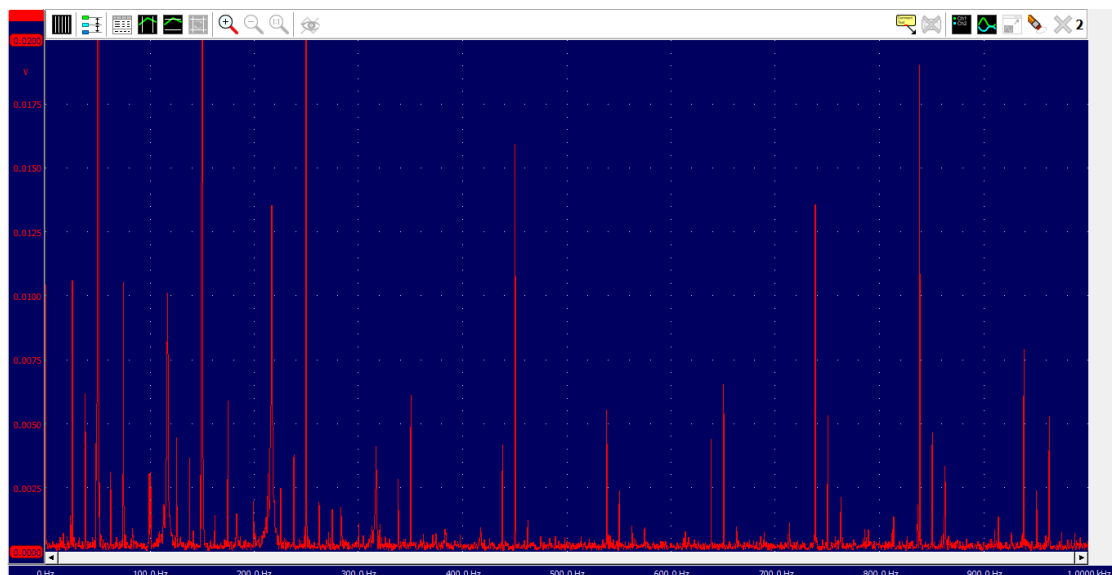




*Obrázek č.14 FFT analýza nepoškozeného motoru při 1425 otáčkách za minutu*



*Obrázek č.15 FFT analýza nepoškozeného motoru při 1450 otáčkách za minutu*

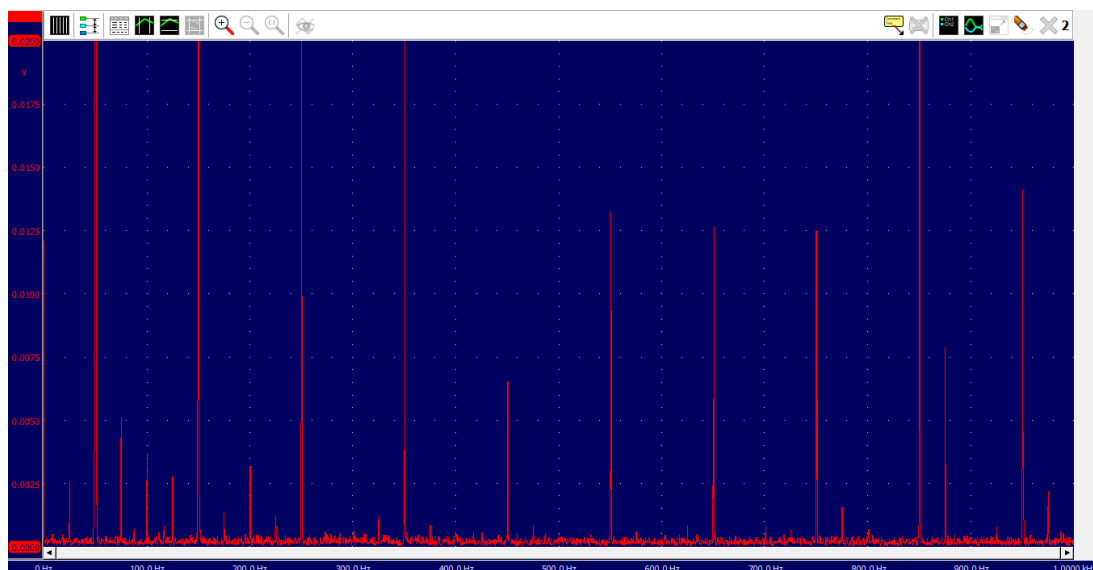


*Obrázek č.16 FFT analýza nepoškozeného motoru při 1475 otáčkách za minutu*

Na těchto obrázcích je vidět graf FFT analýzy, kde jsou vidět hlavně hlavní napájecí frekvence a její liché násobky, ale kromě obrázku naprázdno je vidět také parazitní frekvence způsobené drobnou excentricitou rotoru už z výroby. U všech grafů je stejný rozsah všech os, aby bylo zřetelně vidět, jak se tyto frekvence s přirůstajícím zatížením lehce zvyšují.

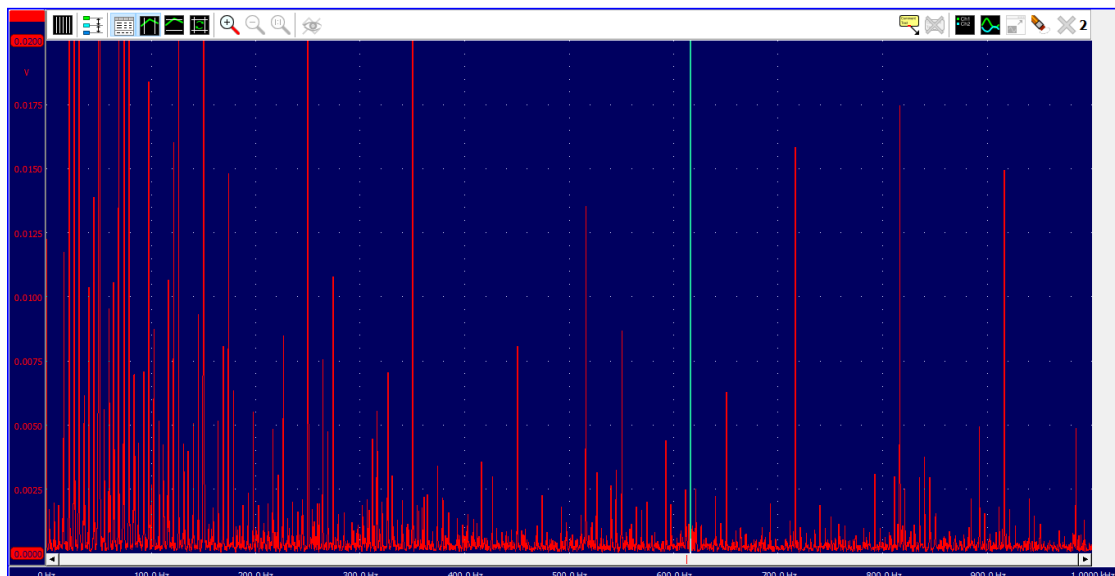
### **6.2.3 FFT analýza poškozeného rotoru**

Naprostě stejným způsobem jako jsem dělal FFT analýzu nepoškozeného motoru, jsem provedl i analýzu motoru, který jsem před měřením poškodil, abych vrtáním přerušil jednu rotorovou tyč. Rozsah os u nepoškozeného i poškozeného motoru nechám stejný, ať je vidět nárůst množství a velikosti parazitních frekvencí. Také je v grafech při otáčkách 1425, 1450 a 1475 vyznačena změřená frekvence, která je uvedena v tabulce č.1.

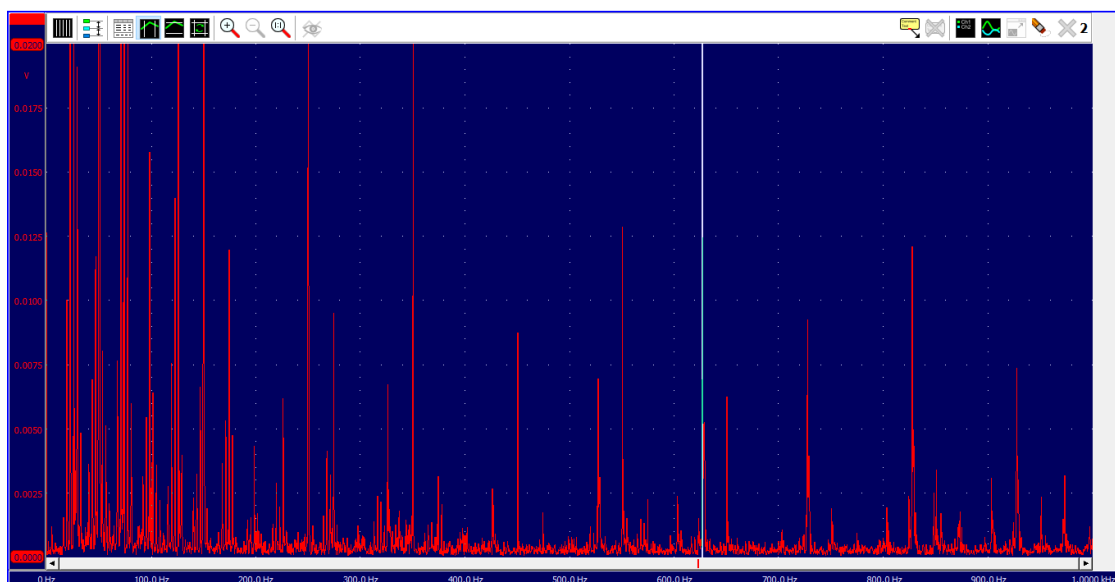


*Obrázek č.17 FFT analýza poškozeného motoru naprázdno*

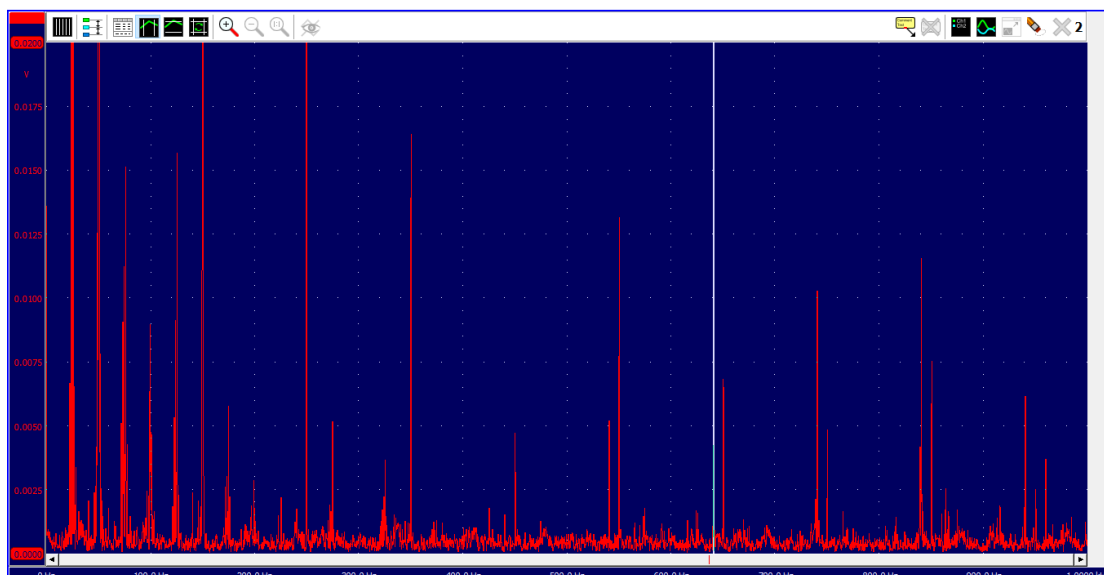
Na obrázku č.17 se dokonce zdá, že poškozený motor má menší excentricitu než motor nepoškozený. Je vidět, že i hodnoty parazitních frekvencí, jsou menší než u nepoškozeného motoru.



*Obrázek č.18 FFT analýza poškozeného motoru při 1425 otáčkách za minutu*



*Obrázek č.19 FFT analýza poškozeného motoru při 1450 otáčkách za minutu*

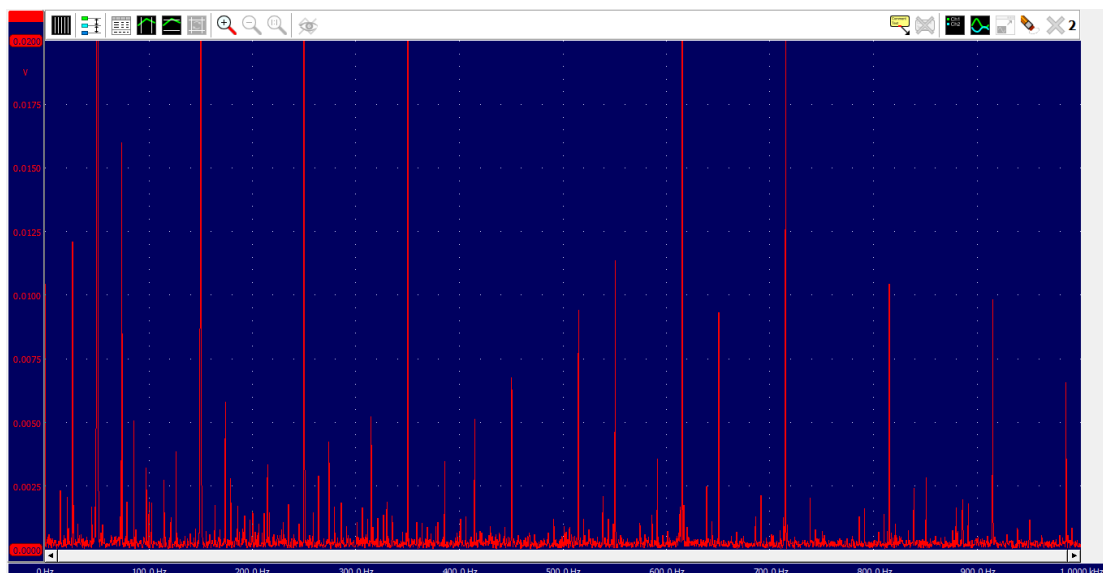


*Obrázek č.20 FFT analýza poškozeného motoru při 1475 otáčkách za minutu*

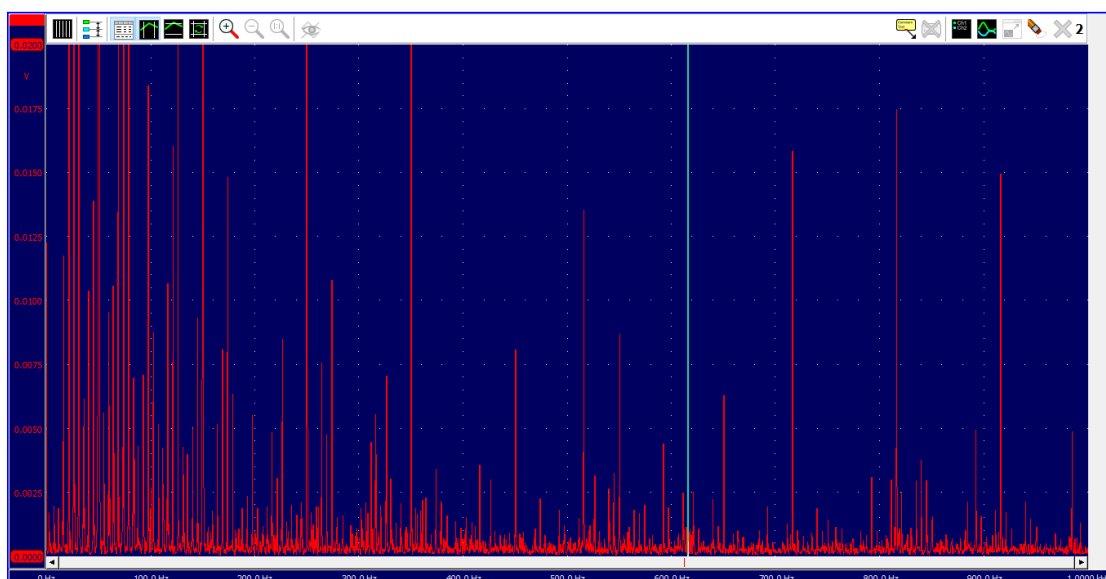
Na těchto grafech, které mají stejné rozsahy os jako u nepoškozeného motoru, je vidět nárůst množství a velikosti parazitních frekvencí. V těchto obrázcích jsou i vyznačeny naměřené frekvence 615 Hz pro 1425 otáček za minutu, 625 Hz pro 1450 otáček za minutu a 637 Hz pro 1475 otáček za minutu. Množství parazitních frekvencí je tedy dáno nesymetrií rotorového pole a jeho nerovnoměrného zatížení, z důvodů prasklé rotorové tyče.

#### **6.2.4 Porovnání při jmenovitých otáčkách**

Budu tyto motory porovnávat při jmenovitých otáčkách 1425 otáček za minutu, protože je zde nejvíce vidět právě rozdíl parazitních frekvencí. Samotné motory se od sebe nedají rozeznat, pokud jsou oba ve složeném stavu a u poškozeného navrtaný rotor, tudíž je zřejmé, že tuto závadu není možno sledovat pouhým okem, ale lze ji zjistit při demontáži, která může zastavit provoz zařízení, ale ani toto nemusí být zřejmé, protože v praxi může rotorová tyč prasknout, aniž by bylo na rotoru jakkoliv poznat, že by byl poškozený. Museli bychom demontovat i samotný rotor. Nebo právě využijeme externí rozptylové pole, ze kterého zjistíme závadu, aniž bychom museli daný motor demontovat a tudíž tak zastavit jeho provoz, i když je díky této poruše nerovnoměrně přetěžován.



*Obrázek č.21 FFT analýza nepoškozeného motoru ve jmenovitých otáčkách*



*Obrázek č.22 FFT analýza poškozeného motoru při jmenovitých otáčkách*

Při porovnání těchto dvou analýz je zřetelně vidět, že druhý motor má vadu. Díky množství parazitních frekvencí, které u nepoškozeného motoru chybí nebo jsou zanedbatelné.

### **6.3 Diagnostika motoru z externího rozptylového pole**

Samotná diagnostická metoda, díky které jsem mohl oba motory změřit, je poměrně snadná a je výhodná v tom, že můžeme diagnostikovat motor, aniž bychom přerušili jeho chod, i když ho musíme trochu korigovat díky zatížení, abychom si ověřili, zda se v něm vyskytla porucha či nikoliv.

Pro tuto analýzu je zapotřebí USB osciloskop, sledovací cívka a počítač s příslušným softwarem. Je to diagnostická metoda v praxi hojně využívaná, právě z důvodu jednoduchosti. Bohužel, jsem abych tuto metodu ověřil musel nenávratně zničit jeden asynchronní motor. Metoda jako taková není ani náročná na softwarové ani hardwarové požadavky.

## 7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo diagnostikovat asynchronní motor z externího rozptylového pole. Využil jsem k této diagnostice nejjednodušší metodu pomocí FFT analýzy.

Před samotnou diagnostikou jsem musel sepsat poznatky o asynchronním motoru. Od konstrukčního řešení až po princip a funkce celého motoru. Věnoval jsem se zde i speciálním druhům konstrukce jako jsou kotvy.

Musel jsem prostudovat tematiku diagnostiky a definovat pojmy, se kterými diagnostika pracuje. Prošel jsem i odvětví technické diagnostiky a její rozdělení podle metod a jejich průběhu. Toto rozdělení je jednoduché a dělí se podle potřeby demontáže, nebo podle potřeby zastavení provozu diagnostikovaného zařízení.

Následně jsem pečlivě prostudoval i samotnou FFT analýzu, kterou jsem využil pro diagnostikování asynchronního motoru, který jsem předtím poškodil a následně porovnal se stejným motorem, který tuto závadu nemá.

Měření těchto dvou motorů probíhalo na půdě školy v laboratoři PORE 223, kde se mimo jiné i vyučují předměty jako elektrické stroje I a II. Zapojení motoru na řídicí pult a zapojení všech měřících karet a následně i USB osciloskopu do počítače jsem zapojil pod dohledem vedoucího bakalářské práce.

Z měření jsem dostal hodnoty, ze kterých jsem udělal samotnou FFT analýzu a vykreslil grafy a následně je porovnal a určil rozdíl mezi motory i mezi samotnými grafy.

Metodu FFT jsem vybral společně s vedoucím bakalářské práce, protože je to jedna z nejjednodušších metod, které lze k diagnostice asynchronního motoru využít. Byl mi vedoucím bakalářské práce doporučen software TiePie, kde jsem udělal samotnou FFT analýzu.

Asynchronní motor jsem vybral, protože je jeden z nejvíce využívaných pohonů napříč různými průmyslovými oblastmi. A jeho diagnostika je tudíž nezbytná pro provoz každé větší průmyslově založené společnosti.

## 8 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] UHLÍŘ, Ivan. Elektrické stroje a pohony. Vyd. 2., přeprac. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03730-0.
- [2] URL: [http://www.stanislav-misak.com/joom15/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&id=5:technick-diagnostika&Itemid=129](http://www.stanislav-misak.com/joom15/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=5:technick-diagnostika&Itemid=129) [online]. [cit. 2019-01-04]. Technická dokumentace na elektrických zařízeních
- [3] URL: [apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf](http://apfyz.upol.cz/ucebnice/down/mini/fourtrans.pdf) [online]. [cit. 2019-04-18]. (Diskrétní) Fourierova Transformace
- [4] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Stator#/media/File:Stator\\_and\\_rotor\\_by\\_Zureks.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Stator#/media/File:Stator_and_rotor_by_Zureks.JPG) [online]. [cit. 2019-04-19]. Fotka z článku na webu wikipedie o statoru v anglickém jazyce
- [5] URL: [https://www.researchgate.net/figure/Smooth-solid-steel-rotor-Kikuchi-and-Kenjo-1997\\_fig1\\_268436920](https://www.researchgate.net/figure/Smooth-solid-steel-rotor-Kikuchi-and-Kenjo-1997_fig1_268436920) [online]. [cit. 2019-04-19]. Computation of eddy currents in a solid rotor induction machine with 2-D and 3-D FEM